



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MĚŘENÍ PARAMETRŮ TROJVINUŤOVÉHO TRANSFORMÁTORU

MEASUREMENT OF THREE-WIRE TRANSFORMER PARAMETERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Frederik Kováč

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vojtěch Wasserbauer

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Frederik Kováč

ID: 186118

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Měření parametrů trojvinutového transformátoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Parametry trojvinutových transformátorů a jejich náhradní schéma
2. Návrh měřicího pracoviště pro měření trojvinutového transformátoru
3. Měření parametrů trojvinutového transformátoru (napětí nakrátko, symetrických složkových impedancí, způsobu zapojení) a vyhodnocení výsledků
4. Návrh laboratorní úlohy pro měření trojvinutového transformátoru

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 29.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Wasserbauer

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa venuje meraniu symetrických zložkových impedancií u trojvinutového transformátora. Práca je rozdelená na teoretickú a praktickú časť. V teoretickej časti je popísaný princíp fungovania transformátora, jeho parametre, meranie naprázdno a nakrátko, meranie netočivých zložiek impedancií a schémy zapojenia. Praktická časť sa zaoberá návrhom meracieho pracoviska v laboratóriu, popisom použitých prístrojov a praktickými meraniami s reálnymi schémami zapojenia. Pre meranie parametrov trojvinutového transformátora je vytvorený laboratórny návod.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Trojvinutový transformátor, meranie, symetrické zložky, súsledná zložka impedancie, netočivá zložka impedancie, prúd naprázdno, napätie nakrátko

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with measuring symmetric componental impedances of three winding transformer. Thesis is divided into a theoretical and practical part. In theoretical part is described principle of transformer operation, its parameters, open-circuited and short-circuited measuring, measuring of zero-sequence impedance and connection schemes. Practical part deals with design of workplace in laboratory, description of used instruments and practical measurements with real connection schemes. For measuring parameters of three winding transformer is created a laboratory instruction manual.

KEYWORDS

Three winding transformer, measuring, symmetric components, positive-sequence impedance, zero-sequence impedance, open-circuit current, short-circuit voltage

KOVÁČ, Frederik. *Měření parametrů trojvíňového transformátoru*. Brno, 2018, 73 s. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedúci práce: Ing. Vojtěch Wasserbauer

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že som svoju bakalársku prácu na tému „Měření parametrů trojvířňového transformátoru“ vypracoval(a) samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor(ka) uvedenej bakalárskej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil(a) autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol(-la) nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý(-á) následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Vojtěchu Wasserbauerovi za odborné vedenie, konzultácie a podnetné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

OBSAH

Zoznam obrázkov	8
Zoznam tabuliek	10
Zoznam symbolov, veličín a skratiek	11
Úvod	14
1 Teoretická časť práce	15
1.1 Transformátor všeobecne	15
1.1.1 Konštrukčné prevedenie transformátorov	15
1.1.2 Princíp činnosti	17
1.1.3 Skutočný transformátor	18
1.1.4 Transformátor naprázdno	19
1.1.5 Transformátor pri zatažení	20
1.1.6 Trojfázový transformátor	23
1.2 Trojvinutový transformátor	24
1.2.1 Súmerné zložky trojfázovej sústavy	25
1.3 Parametre trojvinutového transformátora	26
1.3.1 Výkon transformátoru	26
1.3.2 Meranie odporu vinutí	27
1.3.3 Meranie prevodu	27
1.3.4 Meranie naprázdno	27
1.3.5 Meranie nakrátko	29
1.3.6 Náhradná schéma trojvinutového transformátora	32
1.3.7 Netočivá zložka impedancie a jej meranie	32
2 Praktická časť	39
2.1 Meranie na transformátore	39
2.1.1 Návrh meracieho pracoviska - použité prístroje	39
2.1.2 Štítkové hodnoty meraného transformátora	46
2.1.3 Určenie začiatkov a koncov vinutí	46
2.1.4 Meranie odporu vinutí	47
2.1.5 Meranie prevodu	47
2.1.6 Meranie naprázdno	48
2.1.7 Meranie nakrátko	51
2.1.8 Meranie netočivej zložky impedancie	54
2.2 Laboratórny návod	56

2.2.1	Ciele úlohy	56
2.2.2	Zadanie	56
2.2.3	Teoretický úvod	57
2.2.4	Postup merania	61
3	Záver	64
	Literatúra	65
	Zoznam príloh	67
A	Namerané hodnoty napätia a prúdu a výpočet odporu	68
B	Namerané hodnoty zo skúšky naprázdno	70
C	Namerané hodnoty zo skúšky nakrátko	73

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Usporiadanie magnetického obvodu.[14]	16
1.2	a) Ideálny transformátor naprázdno b) Obvodový model [5]	17
1.3	Skutočný transformátor naprázdno [1]	20
1.4	Náhradná schéma transformátora pri zaťažení	21
1.5	Zaťažovacia charakteristika transformátora moeNIE [5]	22
1.6	Regulácia napätia pomocou odbočiek [5]	22
1.7	Fázorový diagram transformátora s odporovou záťažou	23
1.8	Súmerné zložky trojfázovej sústavy	25
1.9	Náhradné schémy pre jednotlivé zložky symetrickej sústavy [9]	26
1.10	Meranie naprázdno pomocou Aaronovho zapojenia wattmetrov	28
1.11	Náhradná schéma trojvinutového transformátora pri meraní nakrátko	29
1.12	Meranie nakrátko pomocou Aaronovho zapojenia wattmetrov	31
1.13	Náhradná schéma trojvinutového transformátora	32
1.14	Náhradná schéma netočivých impedancií v zapojení $Y_{NY_n d}$	33
1.15	Meranie netočivých impedancií (a) naprázdno (b) nakrátko	34
1.16	Náhradná schéma trojvinutového transformátora s netočivými impedanciami: (a) naprázdno (b) nakrátko	35
1.17	Náhradná schéma trojvinutového transformátora s netočivými impedanciami pri rozpojenom vinutí zapojeného do d: (a) naprázdno (b) nakrátko	36
1.18	Náhradná schéma netočivej zložky impedancie v zapojení Y_{NY_d}	37
1.19	Náhradná schéma netočivej zložky impedancie v zapojení $Y_{NY_n d}$	37
1.20	Náhradná schéma netočivej zložky impedancie v zapojení Y_{Ndd}	38
2.1	Zdroj Statron 2224.2	39
2.2	Multimeter AMPROBE AM-530-EUR	40
2.3	Multimeter UNI-T UT33D	41
2.4	Zobrazovač prechodných dejov Yokogawa DL-850	42
2.5	Analyzátor Chauvin Arnoux C.A 8334B	44
2.6	Meracie pracovisko pri meraní naprázdno	45
2.7	Meracie pracovisko pri meraní nakrátko	45
2.8	Svorkovnica transformátora	46
2.9	Doplnená svorkovnica transformátora	47
2.10	Schéma zapojenia pre meranie odporu vinutí	47
2.11	Schéma zapojenia pre meranie naprázdno	48
2.12	Závislosť účinníka, prúdu a strát v železe od napätia pri meraní naprázdno	50
2.13	Priebehy prúdov naprázdno v jednotlivých fázach	50

2.14	Schéma zapojenia pre meranie nakrátko	51
2.15	Schéma zapojenia pre meranie netočivej impedancie	54
2.16	Schéma zapojenia pre meranie odporu vinutí	57
2.17	Schéma zapojenia pre meranie naprázdno	58
2.18	Schéma zapojenia pre meranie nakrátko	59
2.19	Schéma zapojenia pre meranie netočivej impedancie	61

ZOZNAM TABULIEK

2.1	Chyby multimetra AMPROBE AM-530-EUR	40
2.2	Chyby multimetra UNI-T UT33D	41
2.3	Chyby na vertikálnej ose modulov 701260 a 701251	42
2.4	Chyby senzorov prúdu C173 pre jednotlivé rozsahy	43
2.5	Chyby prístroja Chauvin Arnoux C.A 8334B pri meraní napätí	43
2.6	Chyby senzorov prúdu MN93A pre jednotlivé rozsahy z údajov od výrobcu	44
2.7	Štítkové hodnoty meraného transformátora	46
2.8	Meranie prevodu	48
2.9	Vypočítané hodnoty z merania naprázdno	49
2.10	Vypočítané hodnoty z meraní nakrátko	52
2.11	Výsledné hodnoty z merania nakrátko	53
2.12	Hodnoty z merania čiastkových impedancií pri zapojenom terciárnom vinutí	54
2.13	Hodnoty z merania čiastkových impedancií pri rozpojenom terciárnom vinutí	55
2.14	Skutočné a percentuálne hodnoty netočivých impedancií	56
A.1	Hodnoty odporov primárnych vinutí	68
A.2	Hodnoty odporov sekundárnych vinutí	68
A.3	Hodnoty odporov terciárnych vinutí	69
B.1	Namerané hodnoty zo skúšky naprázdno	70
B.1	Namerané hodnoty zo skúšky naprázdno	71
B.2	Meranie naprázdno	71
B.2	Meranie naprázdno	72
C.1	Namerané hodnoty zo skúšky nakrátko	73

Zoznam symbolov, veličín a skratiek

E	Zdroj napätia	A
I_0	Prúd naprázdno	A
I_1	Prúd primárneho vinutia transformátora	A
I_2	Prúd sekundárneho vinutia transformátora	A
I'_2	Prúd sekundárneho vinutia transformátora prepočítaný na prim. stranu	A
I_3	Prúd terciárneho vinutia transformátora	A
I_{Fe}	Prúd v železe	A
I_k	Prúd nakrátko	A
I_μ	Magnetizačný prúd	A
N_1	Počet závitov primárneho vinutia	-
N_2	Počet závitov sekundárneho vinutia	-
R_1	Činný odpor primárneho vinutia	Ω
R_2	Činný odpor sekundárneho vinutia	Ω
R'_2	Činný odpor sekundárneho vinutia prepočítaný na primárnu stranu	Ω
R_3	Činný odpor terciárneho vinutia	Ω
R_{Fe}	Odpor reprezentujúci straty v železe	Ω
P_0	Príkonná práca naprázdno	W
P_k	Príkonná práca nakrátko	W
$S_{T_{yp}}$	Typový výkon trojviňutového transformátora	VA
S_{N1}	Menovitý výkon primárneho vinutia	VA
S_{N2}	Menovitý výkon sekundárneho vinutia	VA
S_{N3}	Menovitý výkon terciárneho vinutia	VA
U_0	Napätie naprázdno	V
U_1	Napätie primárneho vinutia transformátora	V
U_2	Napätie sekundárneho vinutia transformátora	V
U_A	Napätie vo fázi A	V
U_B	Napätie vo fázi B	V
U_C	Napätie vo fázi C	V
U_k	Napätie nakrátko	V
U_N	Menovité združené napätie	V
U_{N1}	Menovité združené napätie primárneho vinutia	V
U^{N2}	Menovité združené napätie sekundárneho vinutia	V
U^{N2}	Menovité združené napätie terciárneho vinutia	V
X_{r1}	Rozptyľová reaktancia primárneho vinutia	Ω
X_{r2}	Rozptyľová reaktancia sekundárneho vinutia	Ω

X'_{r2}	Rozptylová reaktancia sekundárneho vinutia prepočítaná na prim. stranu	Ω
X_{r3}	Rozptylová reaktancia terciárneho vinutia	Ω
X_{μ}	Magnetizačná reaktancia	Ω
\mathbf{Z}_1	Impedancia primárneho vinutia	Ω
Z_1	Modul pozdĺžnej impedancie primárneho vinutia	Ω
\mathbf{Z}_2	Impedancia sekundárneho vinutia	Ω
Z_2	Modul pozdĺžnej impedancie sekundárneho vinutia	Ω
\mathbf{Z}_3	Impedancia terciárneho vinutia	Ω
Z_3	Modul pozdĺžnej impedancie terciárneho vinutia	Ω
\mathbf{Z}_{μ}	Impedancia magnetizačnej vetvy	Ω
\mathbf{Z}_{10}^0	Netočivá impedancia naprázdno zmeraná z primárnej strany	Ω
\mathbf{Z}_{20}^0	Netočivá impedancia naprázdno zmeraná zo sekundárnej strany	Ω
\mathbf{Z}_{12k}^0	Netočivá impedancia naprázdno zmeraná z primárnej strany	Ω
\mathbf{Z}_{21k}^0	Netočivá impedancia naprázdno zmeraná zo sekundárnej strany	Ω
\mathbf{a}	Operátor natočenia	-
f	Frekvencia	Hz
i_0	Pomerná hodnota prúdu naprázdno	%
p	Prevod transformátora	-
p_{12}	Prevod transformátora medzi primárnym a sekundárnym vinutím	-
p_{13}	Prevod transformátora medzi primárnym a terciárnym vinutím	-
p_{23}	Prevod transformátora medzi sekundárnym a terciárnym vinutím	-
t	Čas	s
u_{iN}	Okamžitá hodnota napätia indukovaná v jednom závite cievky	V
u_{i1}	Okamžitá hodnota indukovaného napätia v primárnom vinutí	V
u_{i2}	Okamžitá hodnota indukovaného napätia v sekundárnom vinutí	V
Φ	Magnetický tok	Wb
ΔU_C	Úbytok napätia na transformátore pri kapacitnej záťaži	W
ΔU_L	Úbytok napätia na transformátore pri induktívnej záťaži	W
ΔU_R	Úbytok napätia na transformátore pri odporovej záťaži	W
ΔP_{Fe}	Straty v železe	W
ΔP_j	Straty vo vinutí	W
ΔP_{j0}	Straty vo vinutí naprázdno	W
ω	Uhlová rýchlosť	rad/s
φ	Fázový posuv medzi napätím a prúdom	°
φ_0	Fázový posuv medzi napätím a prúdom pri meraní naprázdno	°
φ_k	Fázový posuv medzi napätím a prúdom pri meraní nakrátko	°
D	Vinutie zapojené do trojuholníka	
LSD	Least significant digit	
RMS	Root mean square	

Y	Vinutie zapojené do izolovanej hviezdy
Y_N	Vinutie zapojené do hviezdy s vyvedeným nulovým vodičom
j	Imaginárna jednotka

Pozn.1: Netočivé zložky napätí, prúdov a impedancií sú označené horným indexom ⁰, súsledné a spetné zložky sa vzhľadom na ich rovnakú hodnotu uvádzajú bez indexu.

Pozn.2: Komplexné čísla sú značené tučným písmom.

Pozn.3: Pomerné hodnoty impedancií a ich reálne/imaginárne časti sa uvádzajú malými písmenami.

ÚVOD

Bakalárska práca sa zaoberá trojvinutovým transformátorom a meraním jeho parametrov. Cieľom práce je spracovať teoretickú problematiku k danej téme, uskutočniť merania na transformátore a na záver vytvoriť laboratórnu úlohu v laboratóriu elektrických ochrán zameranú na túto tému.

Hlavnou problematikou je vytvorenie komplexného návrhu merania symetrických zložkových impedancií u trojvinutových transformátorov - súslednej a netočivej zložky impedancie, pričom tieto merania sa od dvojvinutových transformátorov spravidla líšia.

V teoretickej časti bude rozobratý základných princíp fungovania transformátora, trojvinutový transformátor a jeho použitie, rozbor merania konkrétnych parametrov trojvinutového transformátora so schémami zapojenia. V praktickej časti bude spracovaný návrh meracieho pracoviska z hľadiska použitých prístrojov a rozboru ich chýb, vykonané merania a následné spracovanie laboratórneho návodu.

1 TEORETICKÁ ČASŤ PRÁCE

V tejto časti práce sú predstavené základy z teórie transformátorov, ich rozdelenie, princíp fungovania a náhradné elektrické schémy. Ďalej sa kapitola venuje trojvínutovému transformátoru, jeho použitiu, rozboru a určeniu parametrov náhradnej schémy. V kapitole je stručne popísaný aj rozklad nesúmernej trojfázovej sústavy na súmerné zložky.

1.1 Transformátor všeobecne

Transformátor je netočivý elektrický stroj, ktorý slúži na zmenu parametrov elektrickej energie a to elektrického napätia, a elektrického prúdu pri stálom kmitočte na základe zákona elektromagnetickej indukcie. Vyrobená elektrická energia má pri výkonných generátoroch napätie od 6 kV do 24 KV. K prenosu elektrickej energie na veľké vzdialenosti je však hospodárne využiť vyššie napätie, 110, 220 a 400 kV, prípadne vyššie v závislosti na prenášanom výkone. Túto zmenu napätia zabezpečujú transformátory. V mieste výroby sa preto používajú transformátory zvyšujúce napätie, v mieste spotreby naopak stroje znižujúce napätie. [1] [2]

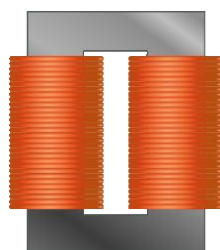
1.1.1 Konštrukčné prevedenie transformátorov

Transformátory z konštrukčného hľadiska delíme podľa

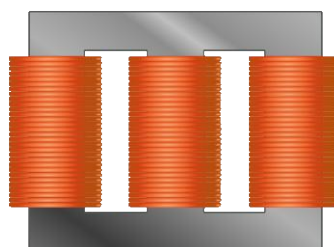
1. prevedenia magnetického obvodu:
 - (a) Jadrové
 - (b) Plášťové
 - (c) Iné typy
2. počtu fází:
 - (a) Jednofázové
 - (b) Trojfázové
3. počtu vinutí na fázu:
 - (a) Dvojvínutové
 - (b) Trojvínutové
4. chladenia:
 - (a) Chladené vzduchom
 - (b) Chladené olejom - vysoké výkony

Jednofázové transformátory sú najčastejšie malého výkonu, vyššie výkony sú využívané len v špeciálnych aplikáciach. Transformátory vyšších výkonov sa spravidla konštruujú ako trojfázové z dôvodu požiadaviek elektrizačnej siete.

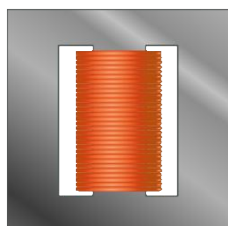
Na obrázku 1.1 sú ilustračne znázornené jednotlivé typy magnetického obvodu. Magnetický obvod je tvorený z feromagnetického materiálu, ktorý je zložený zo vzájomne izolovaných plechov. Toto usporiadanie prispieva k znižovaniu strát výrivými prúdmi. Jednofázové transformátory sa spravidla konštruujú ako plášťové, kedy je vinutie umiestnené na strednom stĺpiku. Výhodou je dobré rozdelenie magnetického toku a tým malé rozptyly, nevýhodou je horšie chladenie. Pri jednofázových jadrových transformátoroch sa pre zníženie rozptylových tokov vinutie vnútri a von rozdeľuje medzi oba stĺpiky. Trojfázové transformátory sú najčastejšie jadrového typu, kde má prierez magnetického obvodu vždy rovnaký priemer. Plášťové trojfázové transformátory sú veľmi ojedinelé kvôli nákladnej výrobe. [1]



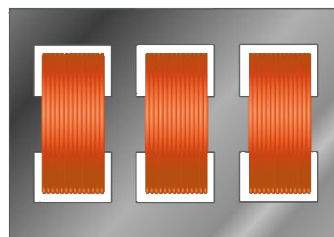
(a) Jednofázový jadrový transformátor.



(b) Trojfázový jadrový transformátor.



(c) Jednofázový plášťový transformátor.



(d) Trojfázový plášťový transformátor.

Obr. 1.1: Usporiadanie magnetického obvodu.[14]

Vinutia transformátorov sa vyrábajú z medených vodičov buď kruhového alebo štvorhranného (obdĺžnikového prípadne štvorcového) prierezu. Podľa vzájomnej polohy vinutí vyššieho a nižšieho napätia a podľa ich umiestnenia na jadrách transformátora rozlišujeme vinutia súsové a priestriedané. Súsové vinutia sa na jadro umiestňujú súso, bližšie k jadru sa obvykle umiestňuje vinutie nižšieho napätia kvôli nižším požiadavkám na izoláciu od magnetického obvodu. U priestriedaného vinutia sa striedajú časti vstupného a výstupného vinutia v smere ich spoločnej osi. Celé vinutie sa rozdelí na symetrické skupiny skladajúce sa z jednej alebo viacerých cievok vyššieho napätia, umiestnených medzi dvoma alebo niekoľkými cievkami nižšieho napätia. [4]

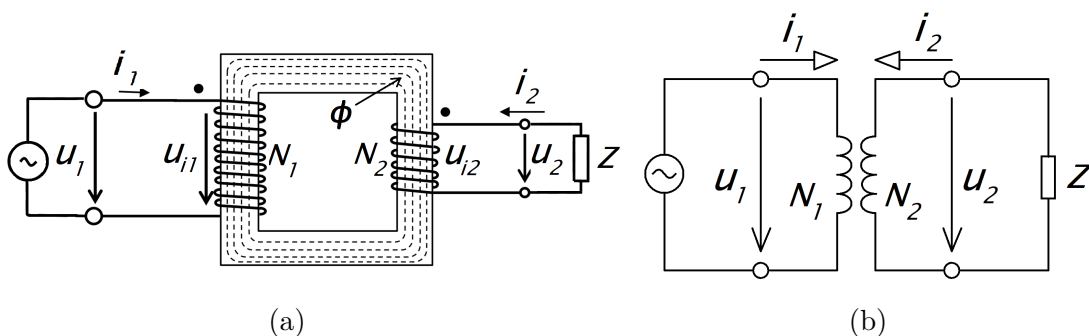
1.1.2 Princíp činnosti

V tejto kapitole bude stručne vysvetlený princíp činnosti transformátora. Pre jednoduchosť budeme uvažovať jednofázový transformátor s jedným vstupným a jedným výstupným vinutím. Tento základný fyzikálny princíp je platný aj pre trojfázové a trojvinutové transformátory.

Ideálny transformátor

Ideálnym transformátorom rozumieme stroj, ktorý nemá žiadne straty. Znamená to, že celý výkon, ktorý dodáme vstupnému vinutiu sa preniesie na výstupné vinutie. Transformátor považujeme za ideálny za nasledujúcich predpokladov:

1. Odpory vinutí sú nulové
2. Magnetický odpor jadra je nulový
3. Rozptylový magnetický tok je nulový [5]



Obr. 1.2: a) Ideálny transformátor naprázdno b) Obvodový model [5]

Na obrázku 1.2 sú znázornené modely ideálneho transformátora. Transformátor má primárne vinutie s N_1 závitmi, ktoré je pripojené na zdroj striedavého napätia a jedno sekundárne vinutie s N_2 závitmi, na ktoré je pripojená záťažná impedancia Z . Primárny prúd prechádzajúci závitmi N_1 vybudí v magnetickom obvode striedavý magnetický tok ϕ s kmitočtom napájacieho napätia f . Časovou zmenou toku sa v jednom závite vstupnej cievky indukuje napätie u_{iN} a vo všetkých jej závitoch napätie u_{i1} , ktorého okamžitá hodnota je daná vzťahom:

$$u_{i1} = u_{iN} \cdot N_1 \quad (1.1)$$

Keďže považujeme rozptyl za nulový, je rovnako veľký magnetický tok spriahnutý so závitmi výstupnej cievky. Potom pre indukované napätie v sekundárnej cievke platí analogický vzťah:

$$u_{i2} = u_{iN} \cdot N_2 \quad (1.2)$$

Napätie indukované v jednom závite cievky sa rovná časovej zmene magnetického toku:

$$u_{iN} = \frac{d\phi}{dt} \quad (1.3)$$

Dosadením 1.3 do 1.1 a 1.2 dostaneme pre indukované napätia vzťahy:

$$\begin{aligned} u_{i1} &= N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \\ u_{i2} &= N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \end{aligned} \quad (1.4)$$

Za predpokladu harmonického priebehu napájacieho napätia a teda aj magnetického toku môžeme odvodiť podľa [1] vzťahy pre veľkosti efektívnych hodnôt indukovaných napätí:

$$\begin{aligned} U_{i1} &= 4,44 \cdot f \cdot \phi \cdot N_1 \\ U_{i2} &= 4,44 \cdot f \cdot \phi \cdot N_2 \end{aligned} \quad (1.5)$$

Prevod transformátoru

Z druhého Kirchhoffoveho zákona platí pre ideálny transformátor:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_{i1} \\ U_2 &= U_{i2} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Dosadením rovníc z 1.6 do 1.5 a ich podelením dostaneme prevod transformátoru p :

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{4,44 \cdot f \cdot \phi \cdot N_1}{4,44 \cdot f \cdot \phi \cdot N_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.7)$$

z čoho vyplýva, že svorkové napätia sú priamo úmerné počtu závitov. Keďže veľkosti výkonov na primárnom a sekundárnom vinutí sa rovnajú, môžeme pre pomer prúdov odvodiť:

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \quad (1.8)$$

potom

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.9)$$

a teda prúdy sú nepriamo úmerné napätiam aj počtu závitov. [1]

1.1.3 Skutočný transformátor

Reálny transformátor má v skutočnosti konečnú hodnotu vodivosti magnetického obvodu, jeho vinutia majú nenulový odpor a okrem hlavného magnetického toku sa vinutiami uzatvárajú aj rozptylové toky. Tieto vlastnosti nám budú reprezentovať pasívne prvky zahrnuté v náhradnej schéme transformátora, ktoré je možno určiť výpočtom alebo meraním.

Prepočet veličín pomocou prevodu transformátora

Pre skúmanie transformátora je výhodné vytvorenie náhradnej schémy (Obr. 1.4), ktorá galvanicky spája vstupné a výstupné vinutie transformátora. Pre jej vytvorenie musíme previesť všetky veličiny na jednu stranu transformátora pomocou prevodu ideálneho transformátora. Prevedené hodnoty budeme značiť s apostroфом.

Veľkosť napätia na jeden závit musí zostať pri prevode zachovaná. Prevedený prúd I'_2 , ktorý prechádza vstupným vinutím s N_1 závitmi musí vytvoriť rovnaké magnetomotorické napätie ako prúd I_2 prechádzajúci závitmi N_2 výstupného vinutia a teda platí:

$$\frac{U_2}{N_2} = \frac{U'_2}{N_1} \implies U'_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot U_2 = p \cdot U_2 \quad (1.10)$$

$$N_1 \cdot I'_2 = N_2 \cdot I_2 \implies I'_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 = \frac{1}{p} \cdot I_2 \quad (1.11)$$

Činný odpor sekundárneho vinutia sa na vstupnú stranu prepočíta z podmienky, aby prepočítaný prúd I'_2 spôsobil v prepočítanom odpore R'_2 rovnaké straty, ako v skutočnom odpore sekundárneho vinutia R_2 vyvolá skutočný prúd I_2 , potom:

$$I_2^2 \cdot R_2 = I_2'^2 \cdot R'_2 \implies R'_2 = R_2 \cdot \frac{I_2'^2}{I_2^2} \quad (1.12)$$

Rovnako prepočítame aj rozptylové reaktancie:

$$X'_{r2} = X_{r2} p^2 \quad (1.13)$$

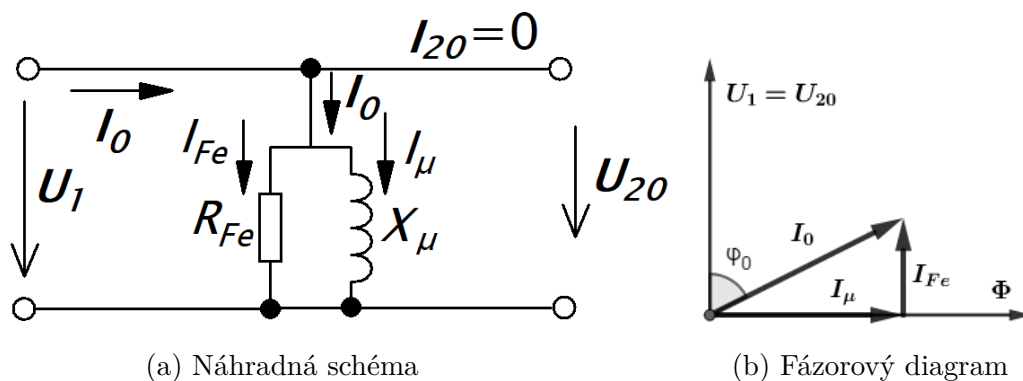
Obdobným spôsobom môžeme prepočítavať všetky prvky náhradnej schémy zo sekundárnej strany na primárnu a opačne. [1][5]

1.1.4 Transformátor naprázdno

K vytvoreniu magnetického toku je potrebné magnetomotorické napätie tzn. aj pri chode naprázdno bude primárnym vinutím pretekať prúd I_μ , ktorý nazývame magnetizačný. V náhradnej schéme prechádza magnetizačný prúd fiktívnou magnetizačnou reaktanciou X_μ , ktorá číselne vyjadruje vplyv napätia indukovaného vo vinutí na veľkosť magnetizačného prúdu a je daná vzťahom:

$$X_\mu = \frac{U_1}{I_\mu} \quad (1.14)$$

Pri striedavej magnetizácii magnetickým tokom vznikajú v magnetickom obvode straty v železe ΔP_{Fe} , ktoré sa skladajú z hysterezných strát a strát výrivými prúdmi. V náhradnej schéme ich reprezentuje odpor R_{Fe} zapojený paralelne k reaktancii X_μ .



Obr. 1.3: Skutočný transformátor naprázdno [1]

Na ich pokrytie odoberá transformátor zo siete prúd v železe I_{Fe} prechádzajúci daným odporom. Keďže straty v železe majú činný charakter, pre odpor R_{Fe} platí:

$$R_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{I_{Fe}^2} \quad (1.15)$$

Z fázorového diagramu na 1.10 je zrejmé, že vektorový súčet magnetizačného a prúdu v železe sa rovná prúdu odoberanému zo siete, ktorý nazývame prúd naprázdno:

$$I_0 = I_\mu + I_{Fe} \quad (1.16)$$

Veľkosť magnetizačného prúdu:

$$I_\mu = I_0 \cdot \sin \varphi_0 = I_0 \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0} \quad (1.17)$$

Veľkosť prúdu v železe:

$$I_{Fe} = I_0 \cdot \cos \varphi_0 \quad (1.18)$$

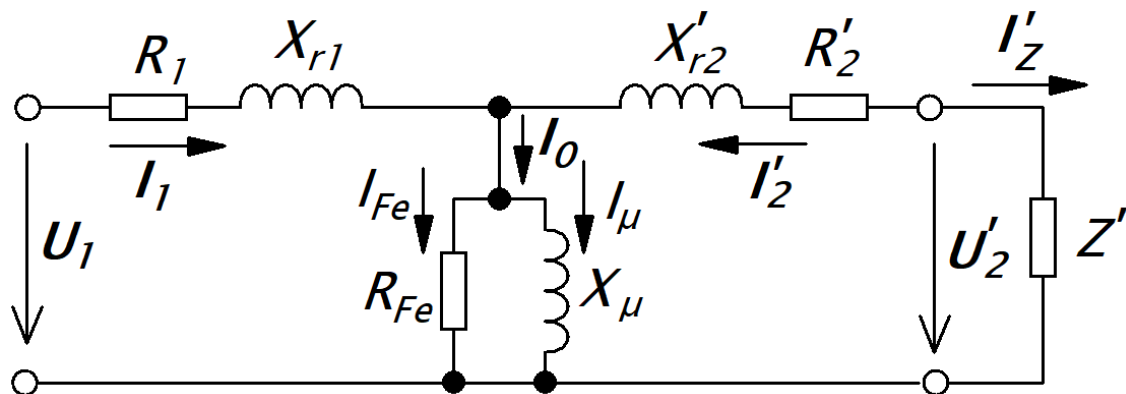
Náhradná schéma a fázorový diagram obrázku 1.10 však nezodpovedajú skutočnosti, pretože v náhradnej schéme zanedbávame činný odpor vinutia a rozptylový magnetický tok budený prúdom naprázdno. Toto zanedbanie je možné vďaka tomu, že prúd naprázdno je pomerne malý, preto je malý aj úbytok napätia na odpore primárneho vinutia a rozptylový magnetický tok. Potom sa aj stratový výkon odoberaný transformátorom naprázdno ΔP_0 rovná stratám v železe ΔP_{Fe} .

Transformátor je spravidla k sieti pripojený trvalo, čo znamená že neustále odoberá výkon na pokrytie strát v železe. Preto je žiadúce, aby boli tieto straty čo najnižšie a podľa ich hodnoty sa posudzuje hospodárnosť a kvalita transformátorov. [1]

1.1.5 Transformátor pri zaťažení

V skutočnom transformátore sa pri zaťažení navyše prejavujú odpory vinutí a rozptylové magnetické toky. V náhradnej schéme na Obr. 1.4 sú odpory vinutí označené

ako R_1 a R'_2 . Celkový magnetický tok sa neuzatvára len magnetickým obvodom, ale obsahuje aj zložky uzatvárajúce sa prevažne vzduchom, ktoré obopínajú závit vstupného a výstupného vinutia. Vplyv týchto rozptylových tokov reprezentujú v náhradnej schéme rozptylové reaktancie X_{r1} a X'_{r2} zapojené v sérii s odpormi vinutia.



Obr. 1.4: Náhradná schéma transformátora pri zaťažení

Menovité svorkové napätie sa na výstupnom vinutí objaví len v prípade, že je transformátor naprázdno a teda prúd prechádzajúci výstupným vinutím je nulový. Pri zaťažení vznikajú úbytky napätí, ktoré závisia na charaktere a veľkosti záťaže. Tieto úbytky vyjadruje zaťažovací charakteristika transformátora na obrázku 1.5, kde pri kapacitnej záťaži ΔU_C napätie mierne stúpa a pri odporovej ΔU_R resp. induktívnej ΔU_L záťaži mierne klesá.

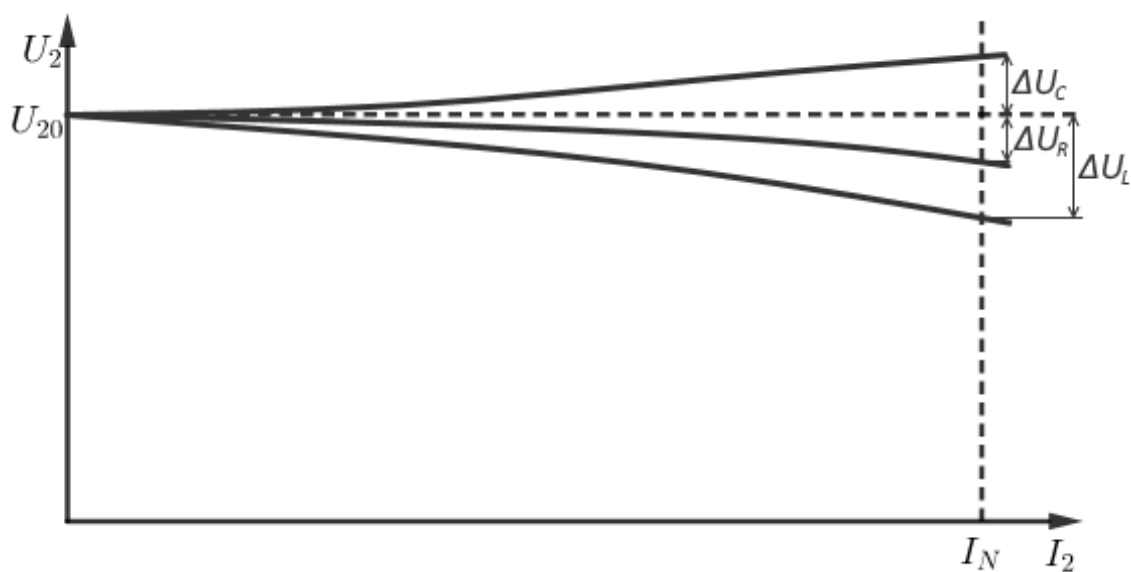
Úbytok napätia vypočítame pri znalosti zaťažovacieho prúdu z náhradnej schémy na Obr. 1.4 pomocou jednej z metód analýzy elektrotechnických obvodov, napríklad metódou uzlových napätí alebo metódou slučkových prúdov. Pri výkonových transformátoroch môžeme zanedbať prúd naprázdno I_0 , ktorý tvorí z prúdu menovitého 2-5%. Tým nám vypadne priečna vetva náhradnej schémy a prúd I_1 sa bude rovnať prúdu I'_2 . [5] Úbytok napätia potom vypočítame ako súčin impedancie pozdĺžnej vetvy náhradnej schémy Z_k a prúdu I_1 :

$$\Delta U = Z_k \cdot I_1 \quad (1.19)$$

Keďže sa jalová časť úbytku napätia prejaví na výstupnom napätí veľmi málo, môžeme ju zanedbať. Potom prejde vzťah 1.19 na:

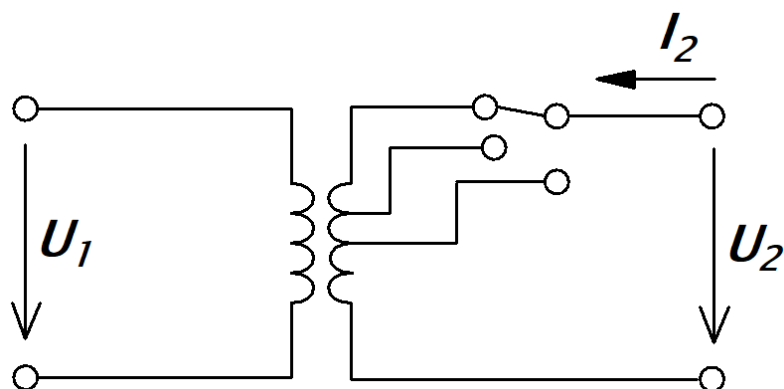
$$\Delta U = I_c \cdot (R_1 + R'_2) + I_j \cdot (X_{r1} + X'_{r2}) \quad (1.20)$$

Pre kompenzáciu úbytkov napätí pri rôznom zaťažení sa využíva regulácia napätia pomocou zmeny prevodu, kedy sa prepínajú odbočky na vstupnom alebo výstupnom vinutí (Obr. 1.6). [5] Výkonové transformátory nad 2 MVA, ktoré musia byť v

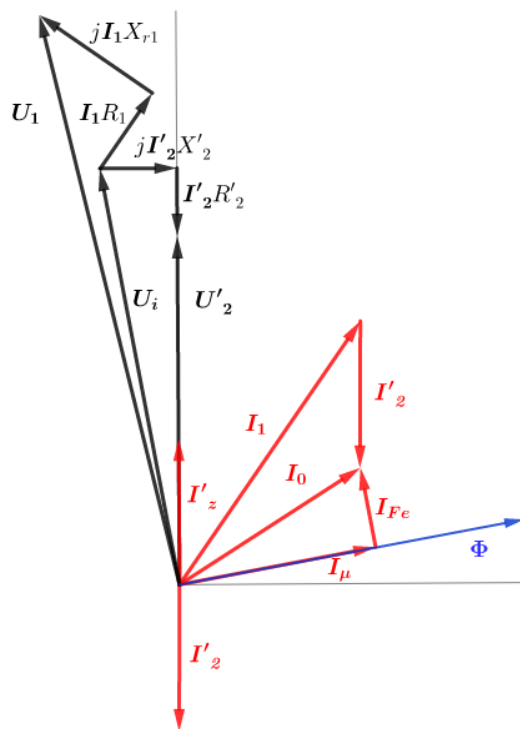


Obr. 1.5: Zaťažovacia charakteristika transformátora [5]

prevádzke bez prerušenia dodávky prúdu sú vybavené odbočkovým prepínačom. Ten obsahuje volič, ktorým sa dopredu nastaví požadovaná odbočka a výkonový spínač, ktorý vykoná prepnutie bez prerušenia dodávky prúdu a bez skratovania cievky. [1]



Obr. 1.6: Regulácia napätia pomocou odbočiek [5]



Obr. 1.7: Fázorový diagram transformátora s odporovou záťažou

1.1.6 Trojfázový transformátor

Trojfázové transformátory sa využívajú v energetike pre prenos a distribúciu elektrickej energie. Trojfázový transformátor je možné zostrojiť z troch jednofázových jednotiek. Skupina troch výkonných jednofázových transformátorov sa v energetike využíva vtedy, keď nie je možné použiť z priestorového a dopravného hľadiska jeden trojfázový transformátor, prípadne pri požiadavke vyššej spoľahlivosti tak, že je pridaný štvrtý transformátor ako záloha. Ďalšou možnosťou je zapojenie vinutí dvoch jednofázových transformátorov spôsobom, že pracujú ako trojfázový transformátor. Trojfázový transformátor, ktorý má vinutia všetkých troch fáz na jednom spoločnom magnetickom jadre je menší, ľahší, lacnejší a pracuje s vyššou účinnosťou ako skupina jednofázových strojov.

Zapojenie vinutí transformátora - hodinový uhol

Vinutia transformátora môžu byť zapojené do hviezdy (y/Y), do trojuholníka (d/D) alebo do lomenej hviezdy (z/Z). Veľké písmena označujú vinutie vyššieho napätia, malé písmená vinutie nižšieho napätia. Vstupné a výstupné vinutie nemusia mať rovnaké zapojenie.

Charakteristickým údajom o zapojení vinutí trojfázového transformátoru je tzv. hodinový uhol. Udáva fázový posuv medzi napätím vstupného a výstupného vinutia,

pričom jedna hodina na ciferníku predstavuje 30° .

Ak je transformátor v zapojení Yd1 znamená to, že primárna strana je zapojená do hviezdy, sekundárna do trojuholníka a fázový posuv medzi primárnym a sekundárnym vinutím je 30° .

Zapojenie Yy má výhody v jednoduchej výrobe, pre požadované napätie je treba najmenší počet závitov vzhľadom k čomu sú cievky menšie, vinutie je priaznivo elektricky namáhané a pri súmernom zaťažení má uzol proti zemi nulové napätie. Ak má vinutie vyššej strany napätia izolovaný uzol, je toto zapojenie veľmi citlivé na nesúmerné zaťaženie. Vplyv nesúmerného zaťaženia možno potlačiť terciárnym vyrovňovacím vinutím zapojeným do trojuholníka. takýto transformátor sa potom označuje ako Yy0/d.

Zapojenia Dy a Yz potláčajú vplyv nesúmerného zaťaženia, ak je vyvedený a zaťažený nulový vodič.

Zapojenie Dd sa používa v prípade, že ako trojfázový transformátor sú použité tri jednofázové jednotky. Pri poruche jednej z nich je možné potom zostávajúce dva spojiť tak, aby bolo možné udržať sieť v prevádzke. Potom ide o zapojenie Vv.

Paralelný chod transformátorov

Transformátory môžu pracovať paralelne, ak sú splnené tieto podmienky:

1. rovnaké vstupné aj výstupné menovité napätie,
2. rovnaký sled fáz,
3. približne rovnaké napätie nakrátko,
4. rovnaký hodinový uhol.

Transformátory pracujú paralelne, ak sú pripojené do rovnakej siete a pracujú na spoločnej prípojnici. [1] Paralelná spolupráca sa využíva napríklad:

- ak je výkon transformátoru nedostačujúci, namiesto výmeny existujúceho transformátoru sa k nemu pridá ďalší, ktorý bude spĺňať dané podmienky
- v prípade, že sa denný odber značne mení, je výhodné použiť viacej transformátorov pracujúcich paralelne, ktoré sa potreby pripájajú a odpájajú. [6]

1.2 Trojvinuťový transformátor

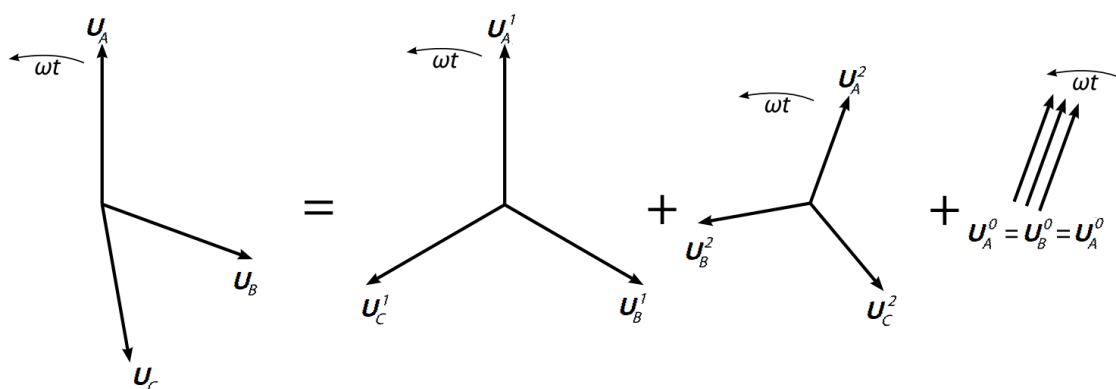
Trojvinuťové transformátory sa delia na transformátory s jedným vstupným a dvoma výstupnými vinutiami a transformátory s dvoma vstupnými a jedným výstupným vinutím. Pre trojvinuťový transformátor je charakteristický vzájomný vplyv jednotlivých vinutí. Použitie trojvinuťového transformátora:

- V elektrických staniciach, kde terciárne vinutie slúži ako zdroj napätia pre vlastnú spotrebu

- V elektrických staniách, kde slúži terciárne vinutie zapojené do trojuholníka pre vyrovňovanie vplyvu nesymetrického zaťaženia
- V elektrárnach, kde je vyvedený výkon dvoch generátorov na jeden blokový transformátor
- Možné spojenie viacerých sietí s rôznymi napäťovými hladinami

1.2.1 Súmerné zložky trojfázovej sústavy

Pri riešení skratových pomerov v sieti je výhodné rozložiť nesúmernú trojfázovú sústavu na súmerné zložky podľa Obr. 1.8. Sústava tak obsahuje súslednú (1), spätnú (2) a netočivú (0) zložku.



Obr. 1.8: Súmerné zložky trojfázovej sústavy

Medzi týmito sústavami platia vzťahy:

$$\begin{aligned} U_A &= U^0 + U^1 + U^2 \\ U_B &= U^0 + a^2 U^1 + a U^2 \\ U_C &= U^0 + a U^1 + a^2 U^2 \end{aligned} \quad (1.21)$$

kde $a = 1 \cdot e^{j120^\circ}$ je operátor natočenia. Symetrické zložky fázorov U^0, U^1, U^2 majú zhodnú frekvenciu ako fázory nesymetrickej sústavy U_A, U_B, U_C .

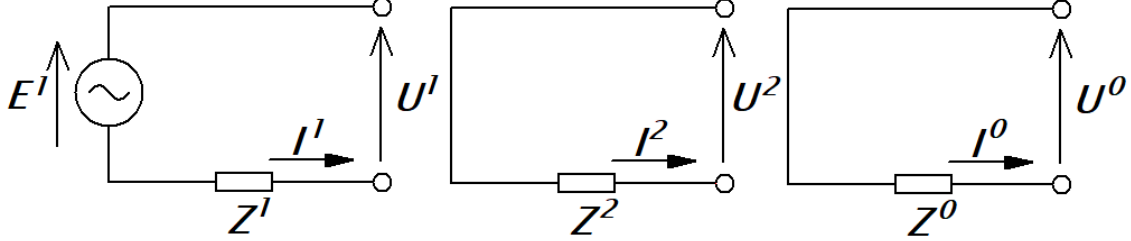
Veľkosť skratového prúdu vypočítame podľa vhodne zvoleného matematického modelu, kedy nahradíme trojfázovú sústavu jednofázovou, pričom je potrebné urobiť rozklad nesymetrickej sústavy. Pre tento rozklad platí:

$$\begin{aligned} E_1 &= I^1 \cdot Z^1 + U^1 \\ E_2 &= I^2 \cdot Z^2 + U^2 \\ E_0 &= I^0 \cdot Z^0 + U^0 \end{aligned} \quad (1.22)$$

Výsledný stav v mieste poruchy získame po vyriešení jednotlivých symetrických zložiek spätnou úpravou na nesymetrickú trojfázovú sústavu podľa 1.21 pre napätia

aj prúdy. Rovnice 1.22 sa ešte ďalej zjednodušia, pretože reálne zdroje napätia majú spätnú a netočivú zložku napätí nulovú tj. $\mathbf{E}^2 = \mathbf{E}^0 = 0$

Na základe rovníc z 1.22 môžeme vytvoriť tri náhradné schémy pre jednotlivé zložky symetrickej sústavy.



Obr. 1.9: Náhradné schémy pre jednotlivé zložky symetrickej sústavy [9]

Vzájomným pospájaním týchto obvodov potom dostaneme schémy pre jednotlivé typy skratov. Z toho dôvodu budú tieť prúdy aj v spätnej a netočivej schéme napriek tomu, že sa tam nenachádzajú zdroje napätia.

Rozdiel medzi súslednou a spätnou zložkou napätí je v zmene sledu fáz, preto sa impedancie v oboch sústavách budú líšiť iba tam, kde sa pri zmene sledu fáz napájacieho zdroja zmenia aj prúdy vo fázach - točivé stroje. Preto pre transformátory sa bude súsledná a spätná zložka impedancie rovnáť, tzn. $\mathbf{Z}^1 = \mathbf{Z}^2$. [9] V tejto práci budú ďalej súsledné a spätné zložky impedancie kvôli prehľadnosti značené bez horného indexu.

1.3 Parametre trojvinuťového transformátora

1.3.1 Výkon transformátoru

Vo všeobecnosti je zdanlivý výkon S trojvinuťového transformátora daný tak, že geometrický súčet výkonov výstupných vinutí sa rovná výkonu vstupného vinutia bez uvažovania strát. Ak by boli výkony všetkých vinutí rovnaké, je zrejmé, že pri rovnakom účinníku nemôžu byť všetky vinutia zaťažené svojim menovitým výkonom (neuvažujúc kapacitnú záťaž). Pre trojvinuťové transformátory sa okrem menovitých výkonov jednotlivých vinutí udáva aj typový výkon:

$$S_{typ} = \frac{S_{N1} + S_{N2} + S_{N3}}{2} \quad (1.23)$$

pomocou ktorého môžeme určiť rozmery a hmotnosť daného transformátora porovnaním s dvojvinuťovým transformátorom rovnakého výkonu. [3]

Pri meraní a skúškach trojvinuťového transformátora je nutné rešpektovať výkony jednotlivých vinutí a niektoré z nich nepreťažovať.

1.3.2 Meranie odporu vinutí

Meranie odporu slúži pre výpočet strát vo vinutí transformátora a výpočet dodatočných strát. Meranie vykonávame pomocou ohmovej metódy pre všetky vinutia každej fázy. Výsledný odpor ekvivalnej jednofázovej náhradnej schémy je potom priemer odporov v každej fáze. Ak nie je vyvedený nulový vodič alebo nie sú vyvedené oba konce vinutí, meriame odpor medzi dvoma fázami a odpor jednej fázy dopočítame. Pomocou zdroja jednosmerného prúdu nastavíme prúd vinutím (tak aby neprišlo k otepleniu vinutia) a po jeho ustálení pripojíme voltmeter, kde odčítame napätie.

Ak nemáme k dispozícii nastaviteľný stabilizovaný zdroj napätia, zaradíme do meraného obvodu ochranný odpor, ktorým pred rozpojením obvodu znížime prúd na minimum. Vybitie vysokej indukčnosti transformátora by sa mohlo prejaviť vznikom prepätia a následným oblúkom. [7]

1.3.3 Meranie prevodu

Prevod vyjadruje číslo, akým sa transformujú prúdy a napätia. Prevod meriame naprázdno, preto ho uskutočňujeme zároveň s meraním naprázdno. Prevod medzi primárnym a sekundárnym vinutím:

$$p_{12} = \frac{U_1}{U_{20}} \quad (1.24)$$

Prevod medzi primárnym a terciárnym vinutím:

$$p_{13} = \frac{U_1}{U_{30}} \quad (1.25)$$

Prevod medzi sekundárnym a terciárnym vinutím:

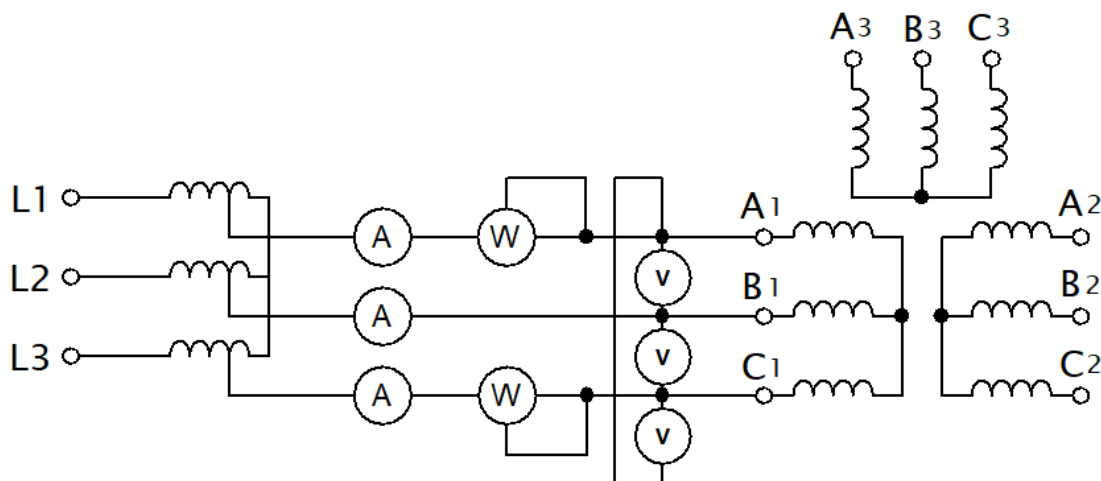
$$p_{23} = \frac{U_{20}}{U_{30}} = \frac{p_{13}}{p_{12}} \quad (1.26)$$

Voltmetre pre meranie napätia musia mať čo najväčší vnútorný odpor, aby nespôsobovali čiastočné zaťaženie. Aby sme obmedzili vplyv magnetizačnej vetvy, transformátor napájame zníženým napätím v rozsahu $(0,1 - 0,7)U_N$. [3]

1.3.4 Meranie naprázdno

Meranie naprázdno sa principiálne nelíši od dvojvinutového transformátora. Účelom tohto merania je určenie strát v magnetickom obvode, stanoviť magnetizačnú charakteristiku transformátora a prúd naprázdno pri menovitom napätí. Ďalej určíme prvky priečnej vetvy náhradnej schémy - magnetizačnú reaktanciu X_μ a odpor reprezentujúci straty v železe R_{Fe} .

Ako zdroj napätia použijeme trojfázový autotransformátor a charakteristiku zmeriame v rozsahu $(0, 1 - 1, 25)U_n$. Meranie naprázdno môžeme vykonať z ktorejkoľvek strany, spravidla sa volí strana najnižšieho napätia vzhľadom k požiadavkam na napájací zdroj. Príklad schémy zapojenia je na Obr. 1.10.



Obr. 1.10: Meranie naprázdno pomocou Aaronovho zapojenia wattmetrov

Z nameraných fázových prúdov a združených napätí vypočítame stredné hodnoty, s ktorými budeme naďalej pracovať v grafoch a náhradnej schéme. Pri tomto meraní je sekundárne a terciárne vinutie transformátora naprázdno a teda z týchto vinutí nie je odoberaná žiadna energia, preto je nameraný príkon spotrebovaný len na straty v železe a straty vo vinutí naprázdno:

$$P_0 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{j0} \quad (1.27)$$

So znalosťou odporu vinutí z predchádzajúceho merania platí pre straty vo vinutí naprázdno:

$$\Delta P_{j0} = 3 \cdot R_1 \cdot I_0^2 \quad (1.28)$$

A straty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_0 - 3 \cdot R_1 \cdot I_0^2 \quad (1.29)$$

Pre účinník naprázdno platí:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot I_0 \cdot U_0} \quad (1.30)$$

Do grafu vynesieme závislosti $U_0 = f(\cos \varphi_0, I_0, P_0, \Delta P_{Fe})$.

Pre menovitú hodnotu $U_0 = U_n$ vypočítame pomocou vzťahov 1.14, 1.15 a 1.17, 1.18 prvky X_μ a R_{Fe} .

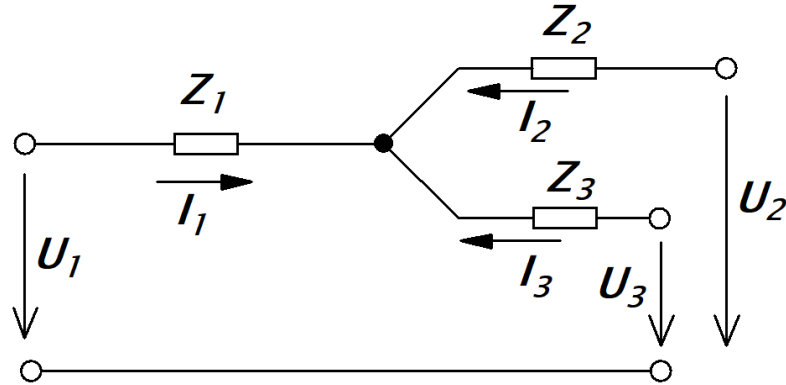
Ak by sme vykonali meranie naprázdno z rôznych strán, veľkosti prúdov naprázdno budú pri menovitom bode iné, ale pomerná hodnota bude zachovaná:

$$i_0 = \frac{I_{0N}}{I_N} \cdot 100 \quad (1.31)$$

Rovnako, ako bolo popísané v kapitole 1.1.4, aj tu by sme mohli zanedbať straty vo vinutí spôsobené magnetizačným prúdom, pričom by sme sa nedopustili veľkej chyby. V technickej praxi sa meranie často vykonáva len pre menovitú hodnotu napätia. [7]

1.3.5 Meranie nakrátko

Meraním nakrátko dokážeme určiť súslednú a spätnú symetrickú zložku pozdĺžnej impedancie transformátora a vyčíslit jednotlivé prvky pozdĺžnej vetvy náhradnej schémy.



Obr. 1.11: Náhradná schéma trojvinutového transformátora pri meraní nakrátko

Pri meraní nakrátko zanedbávame magnetizačnú vetvu, potom pre prúdy platí:

$$\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_3 = 0 \quad (1.32)$$

Pre náhradnú schému na Obr. 1.11 platia podľa [7] vzťahy:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_1 &= (R_1 + jX_{11}) \cdot \mathbf{I}_1 + jX_{12} \cdot \mathbf{I}_2 + jX_{13} \cdot \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{U}_2 &= jX_{12} \cdot \mathbf{I}_1 + (R_2 + jX_{22}) \cdot \mathbf{I}_2 + jX_{13} \cdot \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{U}_3 &= jX_{13} \cdot \mathbf{I}_1 + jX_{23} \cdot \mathbf{I}_2 + (R_3 + jX_{33}) \cdot \mathbf{I}_3 \end{aligned} \quad (1.33)$$

kde X_{11}, X_{22}, X_{33} sú vlastné reaktancie jednotlivých vinutí a X_{12}, X_{13}, X_{23} sú vzájomné reaktancie dvoch rôznych vinutí.

Keďže menovité výkony jednotlivých vinutí nie sú spravidla rovnaké, budeme všetky výpočty realizovať v pomerných jednotkách. Po prepočítaní rovníc z 1.34 na

pomerné jednotky, ich vzájomným odčítaním a dosadením prúdov z 1.32 dostaneme nasledujúce vzťahy:

$$\begin{aligned}\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2 &= [r_1 + j(x_{11} + x_{23} - x_{12} - x_{13})] \cdot \mathbf{i}_1 - [r_2 + j(x_{22} + x_{13} - x_{12} - x_{23})] \cdot \mathbf{i}_2 \\ \mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_3 &= [r_2 + j(x_{22} + x_{13} - x_{12} - x_{23})] \cdot \mathbf{i}_2 - [r_3 + j(x_{33} + x_{12} - x_{23} - x_{13})] \cdot \mathbf{i}_3 \\ \mathbf{u}_3 - \mathbf{u}_1 &= [r_3 + j(x_{33} + x_{12} - x_{23} - x_{13})] \cdot \mathbf{i}_3 - [r_1 + j(x_{11} + x_{23} - x_{12} - x_{13})] \cdot \mathbf{i}_1\end{aligned}\quad (1.34)$$

Reaktancie z 1.34 nahradíme rozptylovými reaktanciami x_1, x_2, x_3 :

$$\begin{aligned}x_{r1} &= x_{11} + x_{23} - x_{12} - x_{13} \\ x_{r2} &= x_{22} + x_{13} - x_{12} - x_{23} \\ x_{r3} &= x_{33} + x_{12} - x_{23} - x_{13}\end{aligned}\quad (1.35)$$

Pre impedancie jednotlivých vinutí platí:

$$\begin{aligned}z_1 &= r_1 + jx_{r1} \\ z_2 &= r_2 + jx_{r2} \\ z_3 &= r_3 + jx_{r3}\end{aligned}\quad (1.36)$$

Po dosadení 1.35 a 1.36 do 1.34 dostaneme:

$$\begin{aligned}\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2 &= z_1 \cdot \mathbf{i}_1 - z_2 \cdot \mathbf{i}_2 \\ \mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_3 &= z_2 \cdot \mathbf{i}_2 - z_3 \cdot \mathbf{i}_3 \\ \mathbf{u}_3 - \mathbf{u}_1 &= z_3 \cdot \mathbf{i}_3 - z_1 \cdot \mathbf{i}_1\end{aligned}\quad (1.37)$$

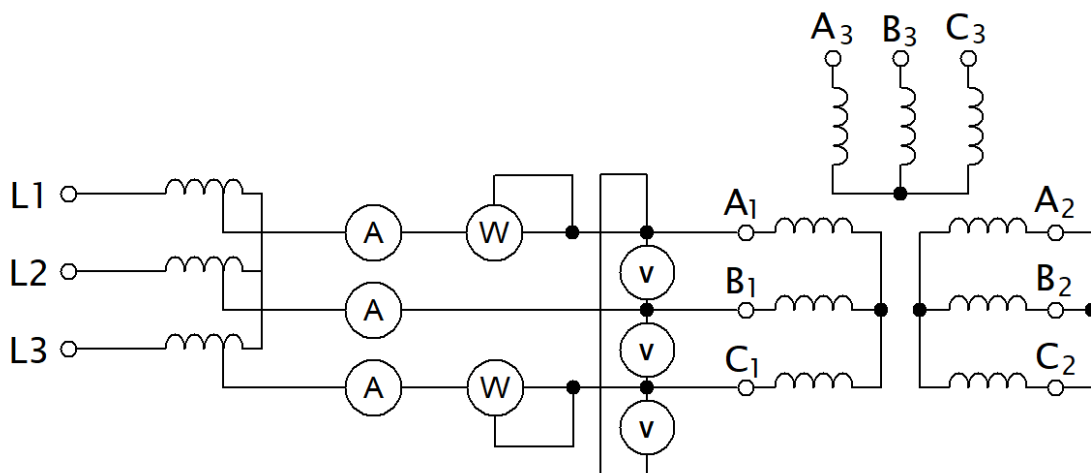
Samotné meranie nakrátko bude zložené z troch čiastkových meraní, kedy sa premerajú všetky dvojice vinutí tak, že je vždy jedno vinutie napájané, jedno skratované (nakrátko) a tretie rozpojené. Princíp merania nakrátko spočíva v tom, že nastavujeme také napätie, aby napájaným vinutím prechádzal jeho menovitý prúd. Príklad konkrétneho zapojenia je na Obr. 1.12, kde je primárne vinutie napájané, sekundárne nakrátko a terciárne rozpojené. Rovnako ako pri meraní naprázdno vypočítame z nameraných hodnôt združených napätí a fázových prúdov strednú hodnotu. Keďže pomerná impedancia nakrátko sa rovná pomernému napätiu nakrátko, bude platiť:

$$z_{12} = u_{12k} = \frac{U_{12k}}{U_{1N}}\quad (1.38)$$

Z nameraného príkonu nakrátko P_{12k} , napätia nakrátko U_{12k} a prúdu nakrátko $I_{12k} \approx I_{N1}$ vypočítame účinník nakrátko $\cos \varphi_{12k}$ a $\sin \varphi_{12k}$:

$$\cos \varphi_{12k} = \frac{P_{12k}}{\sqrt{3} \cdot U_{12k} \cdot I_{12k}}\quad (1.39)$$

$$\sin \varphi_{12k} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{12k}}\quad (1.40)$$



Obr. 1.12: Meranie nakrátko pomocou Aaronovho zapojenia wattmetrov

Pomocou toho určíme činnú a jalovú zložku pomernej impedancie nakrátko z_{12} :

$$z_{12} = r_{12} + jx_{12} = z_{12} \cdot \cos \varphi_{12k} + jz_{12} \cdot \sin \varphi_{12k} \quad (1.41)$$

Obdobné výpočty vykonáme aj pre zvyšné dve kombinácie vinutí, teda pre impedancie z_{13} a z_{23} . Pre zmerané impedancie jednotlivých dvojíc vinutí platí:

$$\begin{aligned} z_{12} &= z_1 + z_2 \\ z_{13} &= z_1 + z_3 \\ z_{23} &= z_2 + z_3 \end{aligned} \quad (1.42)$$

Z rovníc 1.42 vyjadríme vzťahy pre impedancie jednotlivých vinutí:

$$\begin{aligned} z_1 &= \frac{1}{2} \cdot (z_{12} + z_{13} - z_{23}) \\ z_2 &= \frac{1}{2} \cdot (z_{12} + z_{23} - z_{13}) \\ z_3 &= \frac{1}{2} \cdot (z_{13} + z_{23} - z_{12}) \end{aligned} \quad (1.43)$$

Pre skutočné hodnoty impedancií bude platiť:

$$\begin{aligned} Z_1 &= z_1 \cdot \frac{U_{N1}^2}{S_{N1}} \\ Z_2 &= z_2 \cdot \frac{U_{N2}^2}{S_{N2}} \\ Z_3 &= z_3 \cdot \frac{U_{N3}^2}{S_{N3}} \end{aligned} \quad (1.44)$$

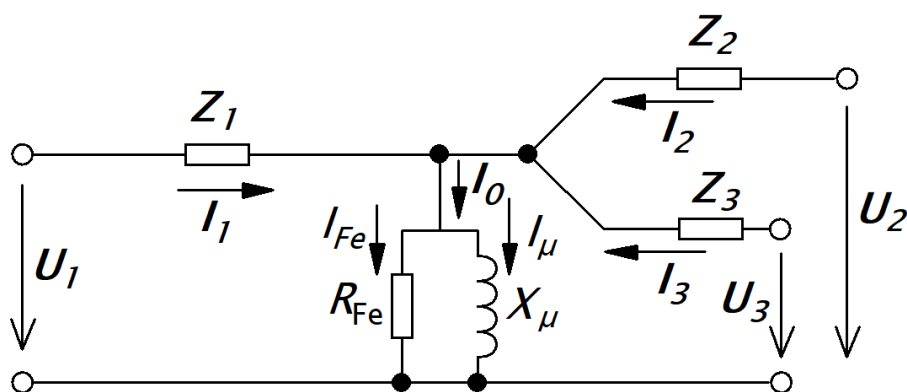
Pri meraní nakrátko je nutné rešpektovať výkony jednotlivých vinutí. V prípade, že by bol výkon primárneho vinutia vyšší ako výkon sekundárneho resp. terciárneho

vinutia, nemôžeme toto vinutie pri skúške nakrátko zaťažiť menovitým prúdom. Ak by bolo sekundárne vinutie nakrátko a terciárne rozpojené, pretekalo by sekundárnym vinutím prúd vyšší ako je menovitá hodnota a tým by sa vinutie preťažilo. Zároveň aby platili vzťahy z 1.42 až 1.44, je nutné dodržať podmienku rovnakého vzťažného výkonu - každá dvojica vinutí musí byť zmeraná pri rovnakom výkone, ktorý si vhodne zvolíme.

1.3.6 Náhradná schéma trojvinutového transformátora

Vytvorenie ekvivalentnej náhradnej schémy je výhodné pre riešenie obvodov, kde sa takýto transformátor nachádza. Prvky náhradnej schémy určíme pomocou merania naprázdno a nakrátko, ich prepočet na žiadanú stranu uskutočníme pomocou vzťahov z kapitoly 1.3.3 a 1.1.3

Na obr. 1.13 je náhradná schéma s prvkami prepočítanými na rovnakú stranu vinutia, pre prehľadnosť sa v schéme neoznačujú prepočítané prvky zvlášť.



Obr. 1.13: Náhradná schéma trojvinutového transformátora

Pre transformátory veľkých výkonov a výpočty skratových prúdov je možné bez väčšej chyby zanedbať priečnu vetvu náhradnej schémy, potom bude platiť schéma ako na Obr. 1.11. [3][7]

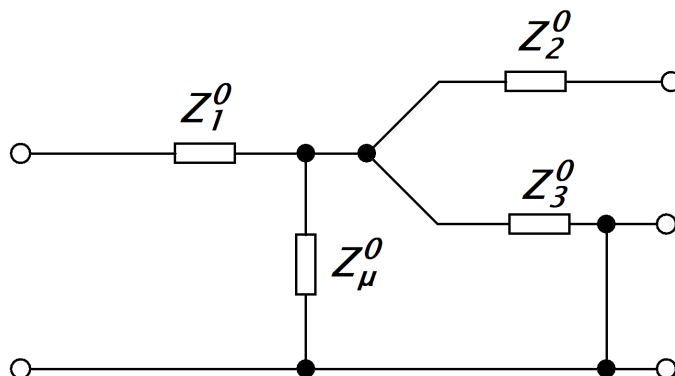
1.3.7 Netočivá zložka impedancie a jej meranie

Znalosť netočivej impedancie je dôležitá pri nesúmerných zaťaženiach transformátora a riešení nesúmerných skratových porúch v sieti. Netočivá impedancia transformátora závisí na usporiadaní jednotlivých vinutí, ich zapojení a typu magnetického obvodu.

Netočivá impedancia má rozdielne veľkosti pri jadrovom a plášťovom usporiadaní transformátora. U jadrového typu sa magnetický tok netočivej zložky prúdu uzatvára

mimo feromagnetického materiálu a to hlavne kovovou nádobou transformátora, u suchých tranformátorov vzduchom a spojovacími prvkami. Pretože magnetická vodivosť týchto častí je menšia ako vodivosť jadra, je potom menšia aj netočivá impedancia Z^0 ako súsledná resp. spätná zložka impedancie Z . U plášťového typu sa môže magnetický tok netočivej zložky uzatvárať plášťom magnetického obvodu, preto sa netočivá zložka impedancie približne rovná súslednej zložke.

Podľa normy [11] má transformátor v zapojení $Y_N Y_n d$ alebo $Y_N Y_n + d$ náhradnú schému netočivých impedancií ako na Obr. 1.14.



Obr. 1.14: Náhradná schéma netočivých impedancií v zapojení $Y_N Y_n d$

Na vyjadrenie netočivých zložiek impedancií trojvinuťového transformátora bola zvolená metóda, kedy sa zmerajú štyri čiastkové impedancie naprázdno a nakrátko pri zapojenom terciárnom vinutí, a štyri čiastkové impedancie naprázdno a nakrátko pri rozpojenom terciárnom vinutí. Ako terciárne uvažujeme vždy vinutie zapojené do trojuholníka. V prípade, že je terciárne vinutie zapojené, zanedbáva sa netočivá impedancia magnetizačnej vetvy a náhradná schéma prechádza v Obr. 1.16. Pri ďalšej sérii meraní je terciárne vinutie rozpojené a náhradná schéma prechádza v Obr. 1.17.

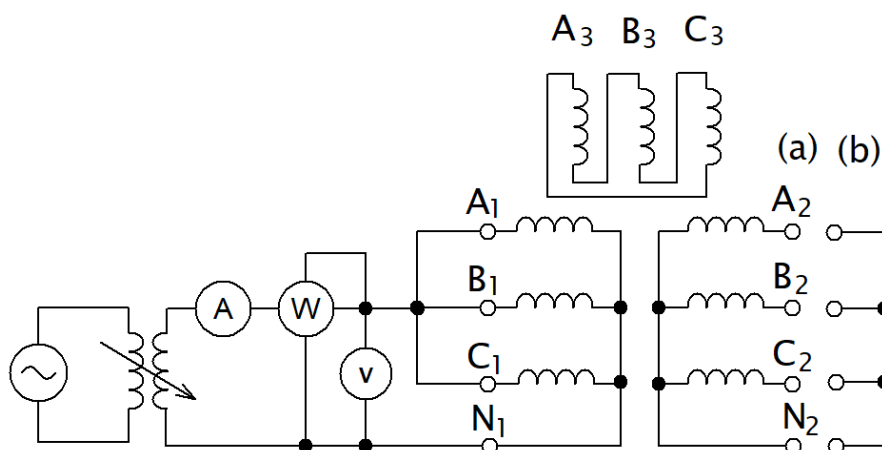
Meracia metodika pre trojvinuťové transformátory v zapojení $Y_N Y_n d$ bola prevzatá z [12] a [13].

Pre meranie impedancie naprázdno zapojíme obvod podľa schémy na Obr. 1.15 (a). Obvod je napájaný zo zdroja napätia tak, že všetky tri fázy sú magnetované súčasne rovnakým napätím, teda medzi jednotlivými fázami nie je žiadny časový posun. To dosiahneme napájaním všetkých fáz z jedného zdroja. Meraním získame netočivú impedanciu zo strany primárneho vinutia naprázdno Z_{10}^0 . Obdobne zmeriame aj impedanciu naprázdno zo sekundárnej strany Z_{20}^0 .

Pre meranie impedancie nakrátko zapojíme obvod podľa schémy na Obr. 1.15 (b). Rovnako, ako v prípade naprázdno, napájame všetky fázy transformátora z jedného zdroja. Pri meraní nakrátko z primárnej strany je primárne vinutie napájané

a sekundárne skratované - nakrátko. Získame tak netočivú impedanciu nakrátko z primárnej strany Z_{12k}^0 . Obdobne zmeriame netočivú impedanciu nakrátko zo sekundárnej strany Z_{21k}^0 , kedy je sekundárne vinutie napájané a primárne skratované - nakrátko.

Pri všetkých čiastkových meraniach by mal pretekať vinutiami menovitý prúd I_N a z daného zapojenia vyplýva, že prúd zo zdroja by bol $3 \cdot I_N$. To by ale nevyhovalo z hľadiska rýchleho oteplenia vinutí, preto nastavujeme pomocou autotransformátora menovitý prúd I_N , pričom bude jednotlivými vinutiami pretekať jeho tretinová hodnota, čo vyhovuje z hľadiska oteplenia aj presnosti merania.



Obr. 1.15: Meranie netočivých impedancií (a) naprázdno (b) nakrátko

Z náhradnej schémy trojvinutového transformátora s netočivými impedanciami na Obr. 1.16 vyplýva, že pri meraní netočivej impedancie naprázdno z primárnej strany prechádza netočivý prúd I^0 impedanciami Z_1^0 a Z_2^0 a platí:

$$Z_{10}^0 = Z_1^0 + Z_3^0 \quad (1.45)$$

Obdobne pri meraní naprázdno zo sekundárnej strany:

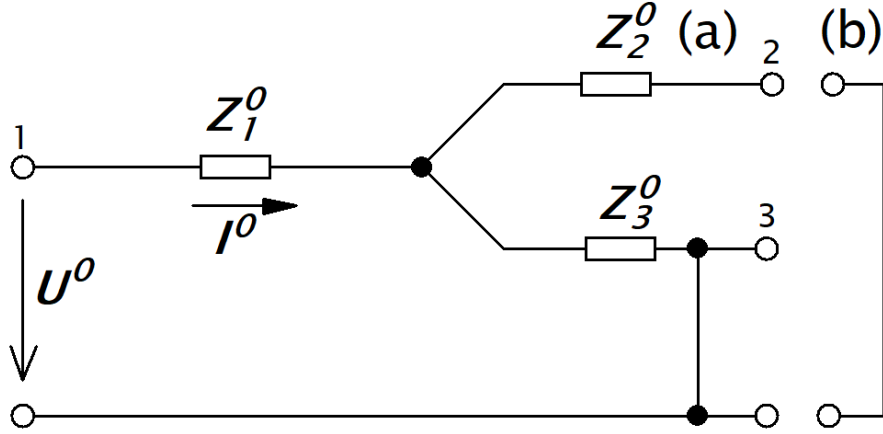
$$Z_{20}^0 = Z_2^0 + Z_3^0 \quad (1.46)$$

Pri meraní nakrátko z primárnej strany prechádza netočivý prúd I^0 impedanciou Z_1^0 a paralelnou kombináciou impedancií Z_2^0 , Z_3^0 . Platí:

$$Z_{12k}^0 = Z_1^0 + \frac{Z_2^0 \cdot Z_3^0}{Z_2^0 + Z_3^0} \quad (1.47)$$

Obdobne pri meraní nakrátko zo sekundárnej strany:

$$Z_{21k}^0 = Z_2^0 + \frac{Z_1^0 \cdot Z_3^0}{Z_1^0 + Z_3^0} \quad (1.48)$$



Obr. 1.16: Náhradná schéma trojvinutového transformátora s netočivými impedanciami: (a) naprázdno (b) nakrátko

Z rovníc 1.45 a 1.46 vyjadríme netočivé impedancie primárneho a sekundárneho vinutia:

$$Z_1^0 = Z_{10}^0 - Z_3^0 \quad (1.49)$$

$$Z_2^0 = Z_{20}^0 - Z_3^0 \quad (1.50)$$

Dosadením rovníc 1.49 a 1.50 do 1.47 a po ich úprave vyjadríme vzťah pre netočivú impedanciu terciárneho vinutia zapojeného v trojuholníku:

$$Z_{12k}^0 = Z_{10}^0 - Z_3^0 + \frac{(Z_{20}^0 - Z_3^0) \cdot Z_3^0}{Z_{20}^0 - Z_3^0 + Z_3^0} \quad (1.51)$$

$$Z_{12k}^0 \cdot Z_{20}^0 = Z_{10}^0 \cdot Z_{20}^0 - Z_3^0 \cdot Z_{20}^0 + Z_3^0 \cdot Z_{20}^0 - (Z_3^0)^2 \quad (1.52)$$

$$(Z_3^0)^2 = Z_{10}^0 \cdot Z_{20}^0 - Z_{12k}^0 \cdot Z_{20}^0 \quad (1.53)$$

$$Z_3^0 = \sqrt{Z_{20}^0 \cdot (Z_{10}^0 - Z_{12k}^0)} \quad (1.54)$$

Dosadením rovníc 1.49 a 1.50 do 1.48 a ich úprave ako v predchádzajúcom prípade dostaneme vzťah:

$$Z_3^0 = \sqrt{Z_{10}^0 \cdot (Z_{20}^0 - Z_{21k}^0)} \quad (1.55)$$

Netočivú impedanciu terciárneho vinutia tak môžeme z daných meraní vypočítať dvomi spôsobmi, pre ďalšie výpočty budeme používať ich strednú hodnotu.

So znalosťou netočivej impedancie terciárneho vinutia môžeme pomocou rovníc 1.49 a 1.50 dopočítať netočivé impedancie primárneho a sekundárneho vinutia.

Pre výpočet impedancií pomocou daných vzťahov je nutné vztiahnuť namerané impedancie na rovnakú stranu transformátora (napr. primárnu). To dosiahneme pomocou prevodu transformátora:

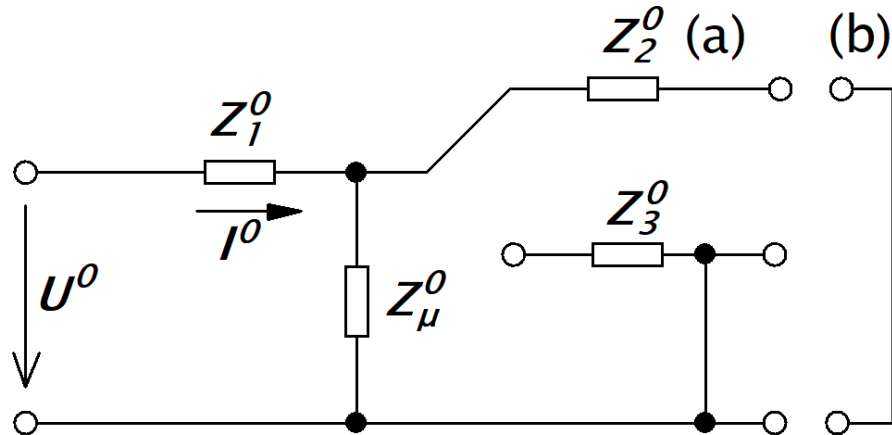
$$Z_{20-p}^0 = Z_{20}^0 \cdot p_{12}^2 = Z_{20}^0 \cdot \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \quad (1.56)$$

$$Z_{21k-p}^0 = Z_{21k-p}^0 \cdot p_{12}^2 = Z_{21k-p}^0 \cdot \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \quad (1.57)$$

Druhou možnosťou je prepočet všetkých nameraných impedancií na pomerné jednotky:

$$z^0 = \frac{Z^0}{Z_N} = \frac{Z^0}{Z_N} \cdot 100 = \frac{Z^0}{\frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N}} \cdot 100 \quad (1.58)$$

Netočivú impedanciu magnetizačnej vetvy Z_μ^0 zmeriame ďalšou sériou meraní tak, že vinutie zapojené v trojuholníku bude rozpojené a teda netočivý prúd nebude týmto vinutím prechádzať. Náhradná schéma netočivých impedancií pri tomto meraní je na Obr. 1.17. Vykonajú sa 4 čiastkové merania rovnako ako v predchádzajúcom prípade, čím získame impedancie Z_{10}^0 , Z_{12k}^0 , Z_{20}^0 , Z_{21k}^0 .



Obr. 1.17: Náhradná schéma trojvinutového transformátora s netočivými impedanciami pri rozpojenom vinutí zapojeného do d: (a) naprázdno (b) nakrátko

Pre namerané impedancie budú platiť ekvivalentné vzťahy ako pri predchádzajúcom meraní, po obdobnom odvodení platia pre netočivú impedanciu magnetizačnej vetvy vzťahy:

$$Z_\mu^0 = \sqrt{Z_{20}^0 \cdot (Z_{10}^0 - Z_{12k}^0)} \quad (1.59)$$

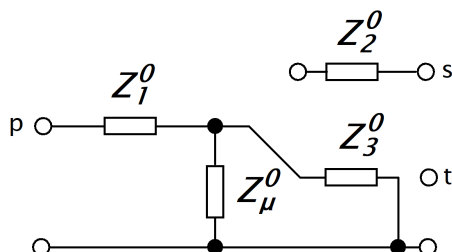
$$Z_\mu^0 = \sqrt{Z_{10}^0 \cdot (Z_{20}^0 - Z_{21k}^0)} \quad (1.60)$$

Výslednú impedanciu určíme ako ich priemer.

Náhradné schémy netočivej zložky impedancie trojvinut'ových transformátorov

Výsledné impedancie netočivej sústavy Z^0 sa podľa [9] líšia z hľadiska zapojenia jednotlivých vinutí prípadne pripojenou záťažou.

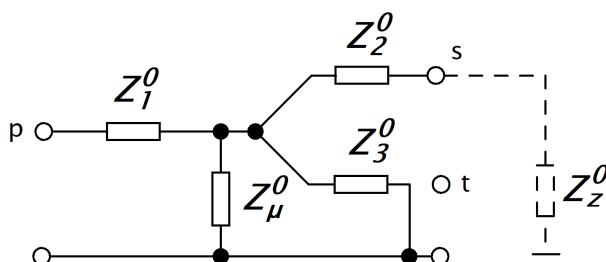
Zapojenie vinutí: Y_{Ny_d}



Obr. 1.18: Náhradná schéma netočivej zložky impedancie v zapojení Y_{Ny_d}

$$Z^0 = Z_1^0 + \frac{Z_3^0 \cdot Z_\mu^0}{Z_3^0 + Z_\mu^0} \quad (1.61)$$

Zapojenie vinutí: Y_{Ny_nd}



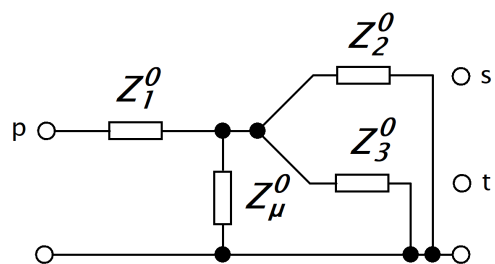
Obr. 1.19: Náhradná schéma netočivej zložky impedancie v zapojení Y_{Ny_nd}

$$Z^0 = Z_1^0 + \frac{1}{\frac{1}{Z_\mu^0} + \frac{1}{Z_2^0 + Z_z^0} + \frac{1}{Z_3^0}} \quad (1.62)$$

kde Z_z^0 je netočivá impedancia záťaže pripojenej k vinutiu zapojeného do y_n .

Zapojenie vinutí: Y_{Ndd}

$$Z^0 = Z_1^0 + \frac{1}{\frac{1}{Z_\mu^0} + \frac{1}{Z_2^0} + \frac{1}{Z_3^0}} \quad (1.63)$$



Obr. 1.20: Náhradná schéma netočivej zložky impedancie v zapojení Y_{Ndd}

V praktických výpočtoch sa netočivá impedancia magnetizačnej vetvy Z_{μ}^0 zanedbáva.

2 PRAKTICKÁ ČASŤ

Praktická časť práce sa zaoberá návrhom pracoviska pre meranie trojvinutového transformátora, rozborom použitých prístrojov a konkrétnym meraním daných parametrov. V závere je vytvorená laboratórna úloha na tému merania parametrov trojvinutového transformátora.

2.1 Meranie na transformátore

2.1.1 Návrh meracieho pracoviska - použité prístroje

Autotransformátor Křížík 3x20

Pre požiadavku regulovateľného zdroja striedavého napätia v rozsahu 0 - 400V je použitý trojfázový autotransformátor. Umožňuje nám regulovať výstupné napätie v rozsahu 0 - 250V na fázu, maximálna fázová prúdová zaťažiteľnosť je 20A. Autotransformátor je napájaný zo striedavej siete 3x230/400V 50Hz.

Zdroj Statron 2224.2

Statron 2224.2 je regulovateľný zdroj jednosmerného napätia v rozsahu 0 - 24V. Maximálny dodávaný prúd je 3,5A a maximálny výkon 168W. Jednosmerný zdroj je použitý pri meraní odporu vinutí pomocou ohmovej metódy.



Obr. 2.1: Zdroj Statron 2224.2

Multimeter AMPROBE AM-530-EUR

AMPROBE AM-530-EUR je TrueRMS číslicový multimeter s automatickou voľbou rozsahu. Displej prístroja má rozlíšenie 4000 kvantovacích krokov. Hodnoty základných chýb sú v Tab. 2.1. Vnútorňý odpor prístroja pre meranie napätia je 10M Ω .

Tab. 2.1: Chyby multimetra AMPROBE AM-530-EUR

Rozsahy	Rozlíšenie	Presnosť
Meranie jednosmerného napätia		
400 mV	0,1 mV	$\leq (0,8\% + 3\text{LSD})$
4/40/400 V	1/10/100 mV	$\leq (0,8\% + 1\text{LSD})$
600V	1 V	$\leq (1\% + 3\text{LSD})$
Meranie striedavého napätia		
400 mV	0,1 mV	$\leq (1,2\% + 3\text{LSD})$
4/40/400 V	1/10/100 mV	$\leq (1,0\% + 3\text{LSD})$
600 V	1 V	$\leq (1,2\% + 3\text{LSD})$
Meranie jednosmerného prúdu		
400/4000 μA	0,1 μA	$\leq (1,2\% + 3\text{LSD})$
40/400 mA	1 μA	$\leq (1,2\% + 3\text{LSD})$
4/10 A	1/10 mA	$\leq (1,5\% + 3\text{LSD})$
Meranie striedavého prúdu		
400/4000 μA	0,1 μA	$\leq (1,2\% + 3\text{LSD})$
40/400 mA	1 μA	$\leq (1,2\% + 3\text{LSD})$
4/10 A	1/10 mA	$\leq (1,5\% + 3\text{LSD})$
Meranie odporu		
400 Ω	0,1 Ω	$\leq (1,2\% + 2\text{LSD})$
4/40/400 k Ω	1/10/100 Ω	$\leq (1,0\% + 2\text{LSD})$
4 M Ω	1 k Ω	$\leq (1,2\% + 2\text{LSD})$
40 M Ω	10 k Ω	$\leq (1,5\% + 5\text{LSD})$



Obr. 2.2: Multimeter AMPROBE AM-530-EUR

Multimeter UNI-T UT33D

UNI-T UT33D je číslicový multimeter, ktorý dokáže merať jednosmerné a striedavé napätie, odpor a jednosmerný prúd. Vnútny odpor prístroja pre meranie napätia je $10\text{M}\Omega$. Hodnoty základných chýb sú zobrazené v Tab. 2.2. Displej má rozlíšenie 2000 kvantovacích krokov. Multimeter je použitý ako ampérmeter pri meraní odporu vinutí ohmovou metódou.

Tab. 2.2: Chyby multimetra UNI-T UT33D

Meraná veličina	Rozsahy	Presnosť
Jednosmerné napätie	200/2000 mV, 20/200/500 V	$\leq (0,5\% + 2\text{LSD})$
Striedavé napätie	200/500V	$\leq (1,2\% + 10\text{LSD})$
Jednosmerný prúd	2000 μA , 20/200 mA, 10A	$\leq (1\% + 2\text{LSD})$
Odpor	200/2000 Ω , 20/200 k Ω , 20/200 k Ω	$\leq (0,8\% + 2\text{LSD})$



Obr. 2.3: Multimeter UNI-T UT33D

Zobrazovač prechodných dejov Yokogawa DL-850

Zobrazovačom Yokogawa meriame priebehy napätí a prúdov. Signály možno spracovávať pomocou vstavaných matematických funkcií, zaznamenávať do súborov, prípadne zistiť amplitúdové a fázové spektrum pomocou furierovej transformácie. Zobrazovač prechodných dejov má 16 kanálov a 8 pozícií na pripojenie modulov. Na pozíciách 1 - 3 sú pripojené napäťové moduly 701260, každý z nich má 2 vstupné kanály. K modulom sú pripojené napäťové sondy pracujúce bez prevodu. Na pozíciách 5 - 8 sú pripojené napäťové moduly 701251, každý z nich má 2 vstupné kanály. K nim sú pre meranie prúdu k dispozícii senzory Chauvin Arnoux C173 s nastaviteľným rozsahom 1-1000 A. Pozícia 4 je prázdna, na kanáloch 7 a 8 je možné využívať

len matematické funkcie. Základné chyby modulov 701260 a 701251 sú v Tab. 2.3. Chyby senzorov prúdu sú pre jednotlivé rozsahy zobrazené v Tab. 2.4.

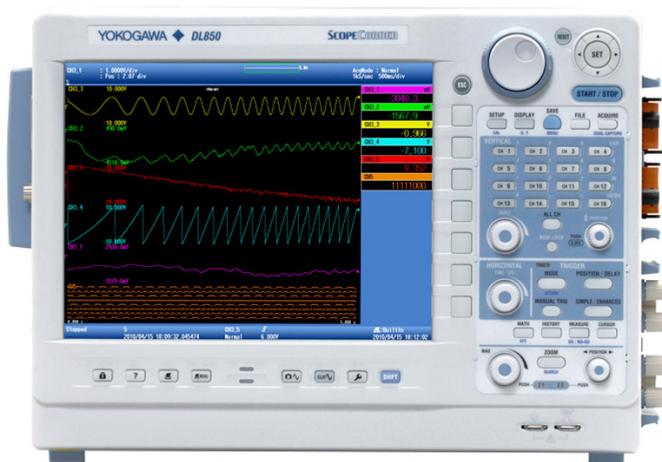
Tab. 2.3: Chyby na vertikálnej ose modulov 701260 a 701251

701260

Vlastnosti signálu	Chyba
Striedavé napätie	$\leq (1,5\% \text{ z } 10 \text{ dielov})$
Striedavé napätie (ak činiteľ výkyvu ≤ 2)	$\leq (2,0\% \text{ z } 10 \text{ dielov})$
Striedavé napätie (ak činiteľ výkyvu ≤ 3)	$\leq (3,0\% \text{ z } 10 \text{ dielov})$

701251

Rozsah	Chyba
50 mV - 200 V	$\leq (0,25\% \text{ z rozsahu})$
20 mV	$\leq (0,3\% \text{ z rozsahu})$
10 mV	$\leq (0,5\% \text{ z rozsahu})$



Obr. 2.4: Zobrazovač prechodných dejov Yokogawa DL-850

Tab. 2.4: Chyby senzorov prúdu C173 pre jednotlivé rozsahy

Rozsah: 1000A

Meraný prúd	1 - 10 A	10 - 100 A	100 - 1000A	1000 - 1200A
Chyba hodnoty (1)	$\leq 1\% + 0,2 \text{ mV}$	$\leq 0,5\% + 0,2 \text{ mV}$	0,2%	0,2%
Chyba fáze	(2)	$\leq 2^\circ$	$\leq 1^\circ$	$\leq 1^\circ$

Rozsah: 100A

Meraný prúd	0,1 - 1 A	1 - 10 A	10 - 100A	100 - 120A
Chyba hodnoty (1)	$\leq 1\% + 0,2 \text{ mV}$	$\leq 0,5\% + 0,2 \text{ mV}$	0,2%	0,2%
Chyba fáze	(2)	$\leq 2^\circ$	$\leq 1^\circ$	$\leq 1^\circ$

Rozsah: 10A

Meraný prúd	0,01 - 0,1 A	0,1 - 1 A	1 - 10A	10 - 12A
Chyba hodnoty (1)	$\leq 1\% + 0,2 \text{ mV}$	$\leq 0,5\% + 0,2 \text{ mV}$	0,5%	0,5%
Chyba fáze	(2)	$\leq 5^\circ$	$\leq 2^\circ$	$\leq 1^\circ$

Rozsah: 1A

Meraný prúd	0,001 - 0,01 A	0,01 - 0,1 A	0,1 - 1A	1 - 1,2A
Chyba hodnoty (1)	$\leq 3\% + 1 \text{ mV}$	$\leq 3\% + 1 \text{ mV}$	$\leq 0,7\% + 1 \text{ mV}$	$\leq 0,7\% + 1 \text{ mV}$
Chyba fáze	(2)	(2)	$\leq 10^\circ$	$\leq 10^\circ$

% výstupného signálu

(2) nedefinované

Analyzátor siete Chauvin Arnoux C.A 8334B

Chauvin Arnoux C.A 8334B je trojfázový analyzátor elektrických sietí. Prístroj umožňuje merať napätia, prúdy, frekvenciu, činné, zdanlivé a jalové výkony a účinníky. Okrem toho je možné zobrazovať priebehy napätí a prúdov, ich harmonické zložky a dané priebehy ukladať.

Pre meranie prúdu sú k dispozícii senzory MN93A, ktoré majú nastaviteľný prúdový rozsah 5A alebo 100A. Chyby senzorov MN93A pre jednotlivé rozsahy sú zobrazené v Tab. 2.6 Na prúdovom rozsahu 5A zmeriame striedavé prúdy od 5mA do 6A, na rozsahu 100A je to od 100mA do 120A. Rozsah nastavujeme hardvérovo na senzorocho a potrebné je ho nastaviť aj softvérovo na prístroji v kategórii senzory prúdu. V rovnakom nastavení si zvolíme aj prevodník prúdu. Pred samotným meraním je potrebné nastaviť typ meranej siete (napr. jednofázová) v kategórii pripojenie na sieť. Chyby pri meraní napätia sú zhrnuté v Tab. 2.5.

Tab. 2.5: Chyby prístroja Chauvin Arnoux C.A 8334B pri meraní napätí

Meraná veličina	Rozsah	Rozlíšenie	Chyba
Fázové striedavé napätie	6 - 480 V	0,1 V	$\leq (0,5\% + 0,2 \text{ V})$
Združené striedavé napätie	10 - 960 V	0,1 V	$\leq (0,5\% + 0,2 \text{ V})$
Jednosmerné napätie	6 - 680 V	0,1 V	$\leq (1\% + 0,5 \text{ V})$

Tab. 2.6: Chyby senzorov prúdu MN93A pre jednotlivé rozsahy z údajov od výrobcu

Rozsah: 100A

Meraný prúd	0,1 - 1 A	1 - 120 A
Chyba hodnoty (1)	$\leq 0,7\% + 2 \text{ mA}$	$\leq 0,7\%$
Chyba fázy	$\leq 1,5^\circ$	$\leq 0,7^\circ$

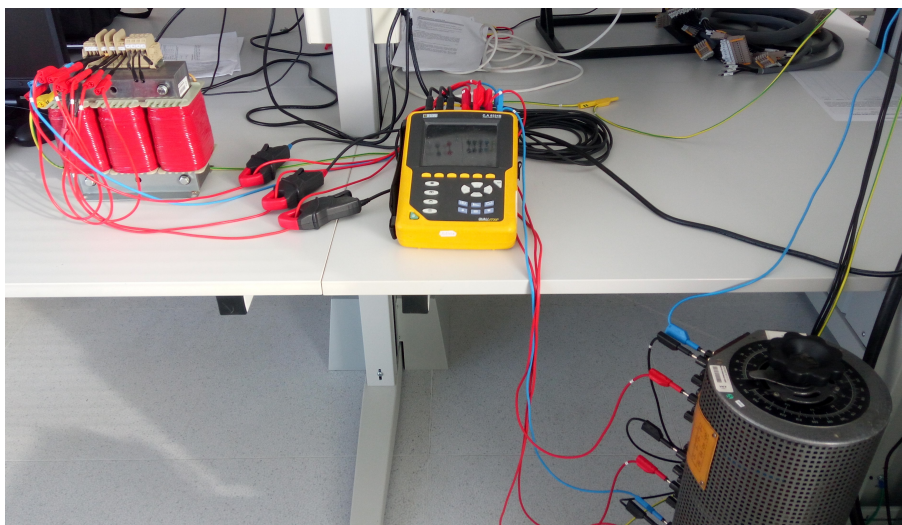
Rozsah: 5A

Meraný prúd v ampéroch	0,005 - 0,05 A	0,05 - 0,5 A	0,5 - 6 A
Chyba hodnoty (1)	$\leq 1\% + 0,1 \text{ mA}$	$\leq 1\%$	$\leq 0,7\%$
Chyba fázy	$\leq 1,7^\circ$	$\leq 1^\circ$	$\leq 1^\circ$

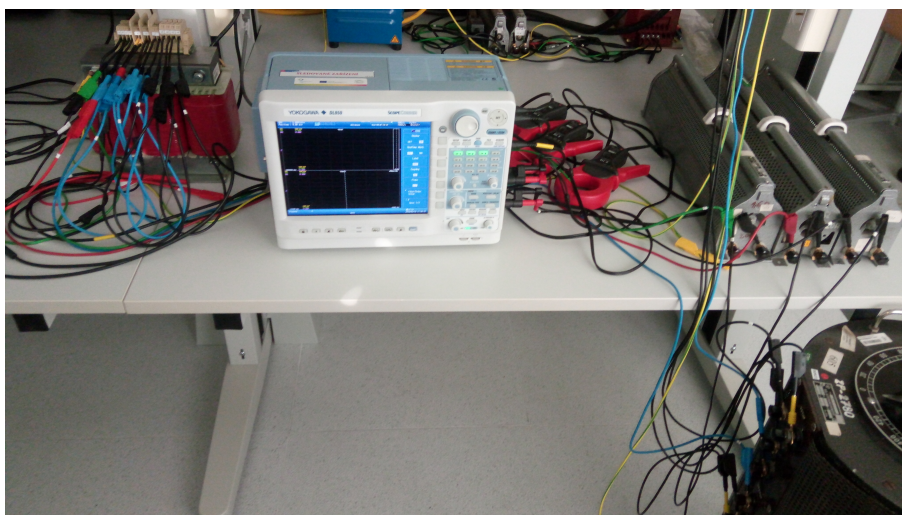
(1) % zo vstupného signálu



Obr. 2.5: Analyzátor Chauvin Arnoux C.A 8334B



Obr. 2.6: Meracie pracovisko pri meraní naprázdno

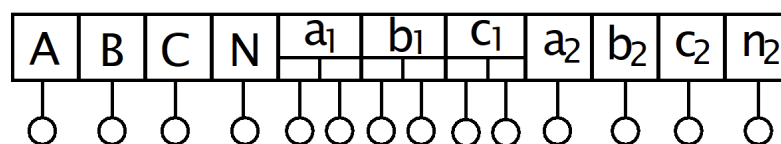


Obr. 2.7: Meracie pracovisko pri meraní nakrátko

2.1.2 Štítkové hodnoty meraného transformátora

Tab. 2.7: Štítkové hodnoty meraného transformátora

Vinutie	S (VA)	U (V)	I (A)	Zapojenie vinutia
Primárne	2000	400/231	2,887	YN
Sekundárne	2000	100/57,7	11,54	yn0
Terciárne	2000	100	11,54	d1



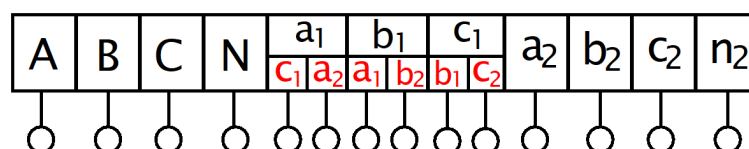
Obr. 2.8: Svorkovnica transformátora

2.1.3 Určenie začiatkov a koncov vinutí

V prípade, kedy máme na svorkovnicu transformátora vyvedené všetky začiatky aj konce vinutí a tieto svorky nie sú označené, prípadne je dané označenie nejasné, je nutné ich presné určenie. V našom prípade sú na svorkovnicu vyvedené začiatky aj konce vinutí terciárnej strany. Pre korektné zapojenie podľa štítku alebo prepojenie vinutia do hviezdy boli zistené ich začiatky a konce nasledujúcim spôsobom.

Jedno vinutie sme napájali z autotransformátora striedavým napätím 10 V a priebeh tohto napätia sme priviedli na osciloskop. Na druhý kanál osciloskopu bolo privedené napätie z druhého vinutia. Podľa fázového posunu týchto napätí sme dokázali určiť zhodné strany vinutí - ak boli napätia vo fáze, boli napájané rovnaké strany vinutí, ak bol fázový posuv 180°, boli napájané vinutia z rôznych strán. Týmto sme zistili rovnaké strany všetkých vinutí, pričom sme jedny z nich spojili do uzlu. Na primárnu stranu sme nakoniec priviedli trojfázové napätie a obdobne pomocou fázového posuvu medzi napätiami zistili hodinový uhol medzi primárnym a terciárnym vinutím (Yy0 alebo Yy6), z čoho sme následne určili začiatky a konce všetkých cievok. Zároveň s týmto meraním sme určili pomocou fázového posuvu sled jednotlivých fáz.

Na Obr. 2.9 je doplnená svorkovnica, kde svorky a_1 , b_1 , c_1 sú začiatky terciárneho vinutia a svorky a_2 , b_2 , c_2 sú konce terciárneho vinutia. Pre zapojenie podľa štítku prepojíme svorky $c_1 - a_2$, $a_1 - b_2$ a $b_1 - c_2$.



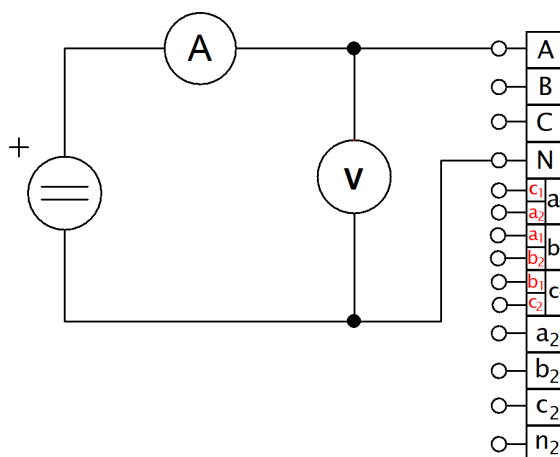
Obr. 2.9: Doplnená svorkovnica transformátora

2.1.4 Meranie odporu vinutí

Meranie odporu jednotlivých vinutí vykonávame podľa zásad uvedených v kapitole 2.1.4. Meranie sme pre každú cievku opakovali 3 krát pre rôzne hodnoty prúdu a z daných meraní vypočítali strednú hodnotu odporu. Namerané a vypočítané hodnoty odporov sú v tabuľkách v prílohe A.

Odpory jednej fázy primárneho, sekundárneho a terciárneho vinutia vypočítame potom ako priemernú hodnotu odporov nameraných v jednotlivých fázach:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{\overline{R_A} + \overline{R_B} + \overline{R_C}}{3} = \frac{0,920 + 0,923 + 0,911}{3} = 0,9180 \, \Omega \\
 R_2 &= \frac{\overline{R_{a2}} + \overline{R_{b2}} + \overline{R_{c2}}}{3} = \frac{0,062 + 0,065 + 0,069}{3} = 0,0653 \, \Omega \\
 R_3 &= \frac{\overline{R_a} + \overline{R_b} + \overline{R_c}}{3} = \frac{0,551 + 0,551 + 0,550}{3} = 0,5507 \, \Omega
 \end{aligned} \tag{2.1}$$



Obr. 2.10: Schéma zapojenia pre meranie odporu vinutí

2.1.5 Meranie prevodu

Schéma zapojenia je rovnaká ako pri meraní naprázdno na Obr. 2.11. Nastavili sme znížené napätie 40V, zmerali napätia medzi všetkými fázami a vypočítali ich priemerné hodnoty (Tab. 2.8).

Tab. 2.8: Meranie prevodu

U_1 (V)	U_{20} (V)	U_{30} (V)
40,033	10,0367	9,9867

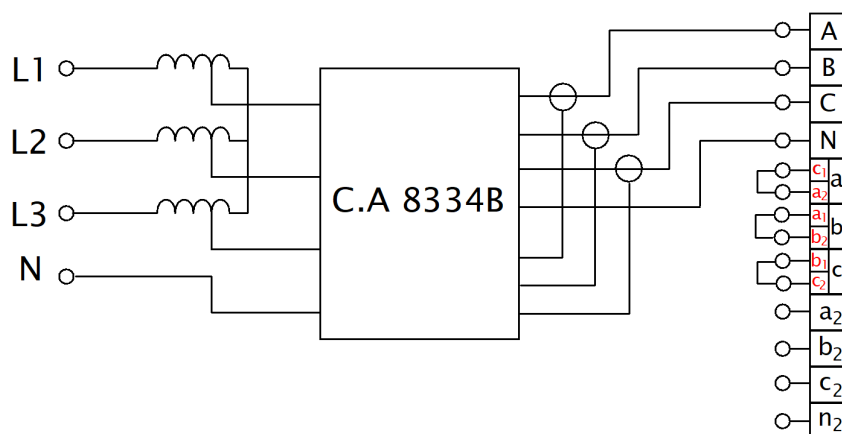
Prevody transformátoru podľa kapitoly 1.3.3:

$$\begin{aligned}
 p_{12} &= \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{40,0033}{9,9867} = 4,0057 \\
 p_{13} &= \frac{U_1}{U_{30}} = \frac{40,0033}{10,0367} = 3,9857 \\
 p_{23} &= \frac{U_{20}}{U_{30}} = \frac{9,9867}{10,0367} = 0,9950
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

V ďalších výpočtoch budeme používať zaokrúhlené hodnoty prevodov na celé číslo.

2.1.6 Meranie naprázdno

Pracovisko sme zapojili podľa schémy na Obr. 2.11. Meranie možno v našom prípade vykonať z akejkoľvek strany transformátora, zvolené bolo napájanie z primárneho vinutia. Pre meranie napätí, prúdov, výkonu a účinníka je použitý analyzátor Chauvin Arnoux C.A 8334B. Prístroj bol zvolený s ohľadom na jednoduchšiu a rýchlejšiu obsluhu oproti zobrazovaču Yokogawa DL-850. Prúd tečúci fázami merajú prúdové kliešte, ktoré sme nastavili na rozsah 5A. V nastaveniach prístroja bol nastavený prúdový prevodník 1000/5A, preto sú namerané hodnoty prúdov a výkonu (Tab. B.1) 200 násobne vyššie.



Obr. 2.11: Schéma zapojenia pre meranie naprázdno

V Tab. B.2 sú namerané hodnoty prepočítané pomocou prevodu meracieho prístroja a vypočítaný priemer nameraných združených napätí a fázových prúdov.

Straty vo vinutí prechádzajúcim prúdom naprázdno a straty v železe sme vypočítali pomocou vzťahov 1.28 a 1.29 s využitím znalosti nameraného odporu primárneho vinutia. Z danej tabuľky môžeme vidieť, že straty vo vinutí naprázdno sú veľmi malé, preto sa nameraný výkon naprázdno približne rovná stratám v železe: $P_0 \approx P_{Fe}$.

Pomerná hodnota prúdu naprázdno pri menovitom napätí:

$$i_0 = \frac{I_{10}}{I_N} \cdot 100 = \frac{0,260}{2,887} \cdot 100 = 9 \text{ \%} \quad (2.3)$$

Výpočet magnetizačného prúdu a prúdu určujúceho straty v železe:

$$I_\mu = I_{10} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0} = 0,260 \cdot \sqrt{1 - 0,409^2} = 0,2373 \text{ A} \quad (2.4)$$

$$I_{Fe} = I_{10} \cdot \cos \varphi_0 = 0,260 \cdot 0,409 = 0,1063 \text{ A} \quad (2.5)$$

Výpočet prvkov náhradnej jednofázovej schémy pre nominálne napätie:

$$X_\mu = \frac{U_{10}}{\sqrt{3} \cdot I_\mu} = \frac{399,733}{\sqrt{3} \cdot 0,2373} = 972,72 \text{ } \Omega \quad (2.6)$$

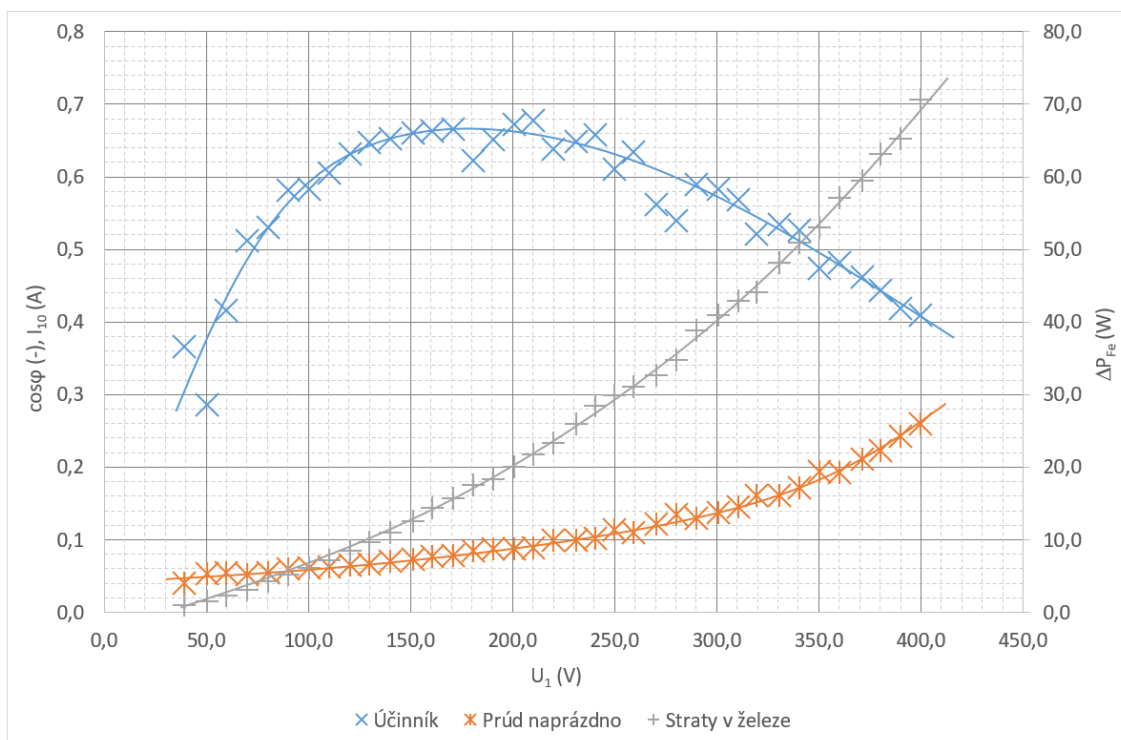
$$R_{Fe} = \frac{U_{10}}{\sqrt{3} \cdot I_{Fe}} = \frac{399,733}{\sqrt{3} \cdot 0,1063} = 2171,08 \text{ } \Omega \quad (2.7)$$

Prvky náhradnej schémy možno prepočítať so znalosťou prevodu na sekundárnu príp. terciárnu stranu transformátora. Meranie naprázdno sme pre menovité napätia uskutočnili aj zo sekundárnej a terciárnej strany. Vypočítané hodnoty zo všetkých meraní sú zhrnuté v Tab. 2.9.

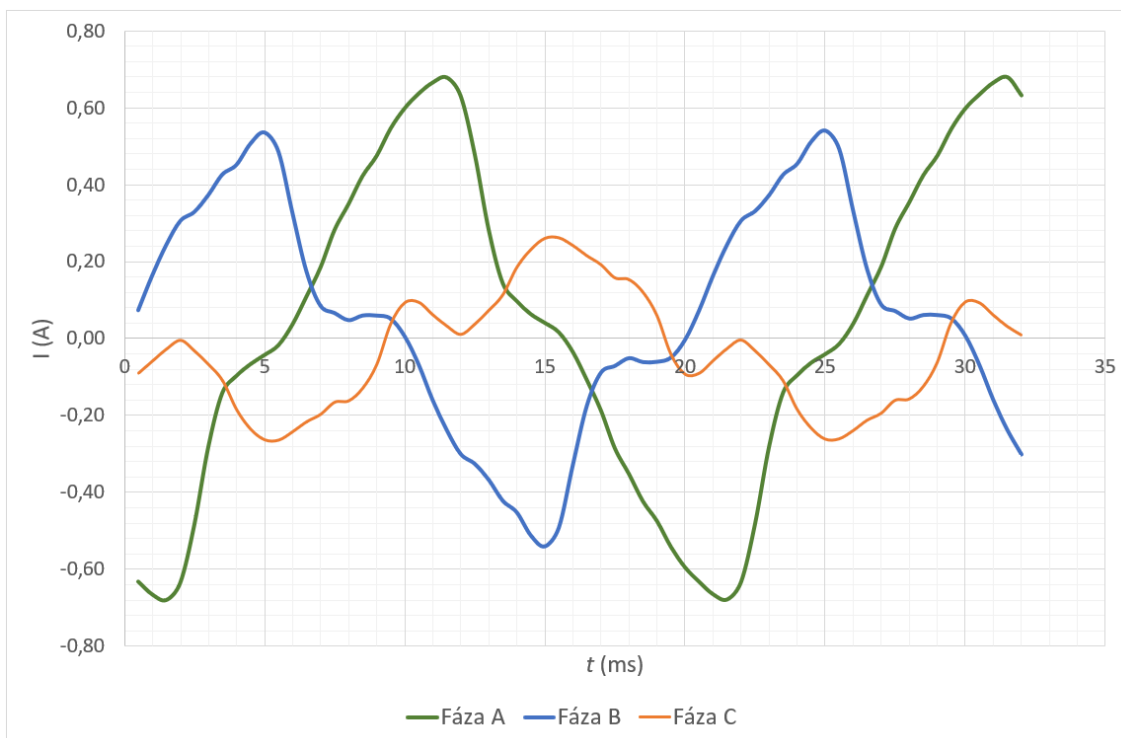
Tab. 2.9: Vypočítané hodnoty z merania naprázdno

Napájané vinutie	i_0 (%)	R_{Fe} (Ω)	X_μ (Ω)
Primárne	9	2171,08	972,72
Sekundárne	9,11	131,72	61,13
Terciárne	8,9	133,62	62,38

V grafe na Obr. 2.12 sú zobrazené priebehy účinníka naprázdno, prúdu naprázdno a strát v železe v závislosti na napájacom napätí pri skúške naprázdno zo strany primárneho vinutia. Tieto priebehy majú len orientačný charakter vzhľadom na to, že silové transformátory sa prevádzkujú približne pri ich nominálnom napätí. V grafe na Obr. 2.12 sú zobrazené priebehy prúdov naprázdno, z ktorých je vidieť nesymetriu meraného transformátora.



Obr. 2.12: Závislosť účinníka, prúdu a strát v železe od napätia pri meraní naprázdno

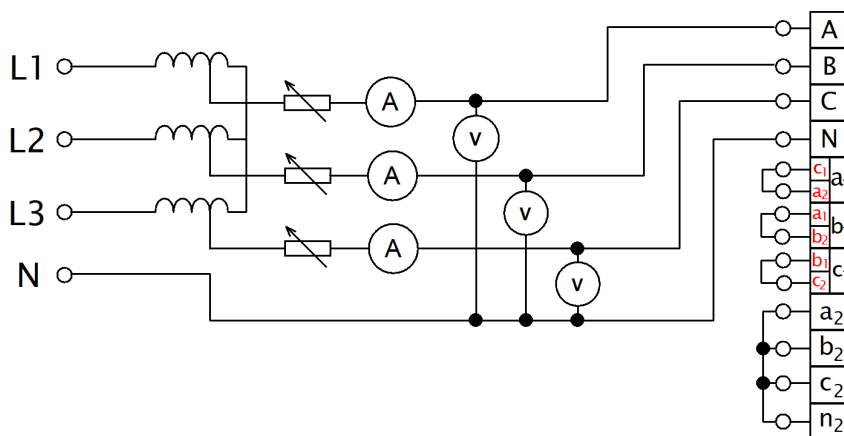


Obr. 2.13: Priebehy prúdov naprázdno v jednotlivých fázach

2.1.7 Meranie nakrátko

Pracovisko sme zapojili podľa schémy na Obr. 2.14, kedy je primárne vinutie napájané, sekundárne nakrátko a terciárne rozpojené, získali sme tak impedanciu z_{12} . Obdobne sme zmerali impedanciu z_{13} , kedy je primárne vinutie napájané, sekundárne nakrátko a terciárne rozpojené, a impedanciu z_{23} , kedy je primárne vinutie rozpojené, sekundárne nakrátko a terciárne rozpojené.

Pre meranie napätí, prúdov a ich fázových posunov bol použitý zaznamenávač Yokogawa DL850. V schéme na Obr. 2.14 značia voltmetre/ampérmetre napäťové a prúdové sondy osciloskopu. Pri jednotlivých meraniach je nutné na prúdových kliešťach nastaviť vhodný rozsah podľa menovitého prúdu napájaného vinutia - používame rozsah 10 A pri meraní zo strany primárneho vinutia a 100 A zo strany sekundárneho a terciárneho vinutia. Pre presnejšie nastavenie prúdov v jednotlivých fázach boli za autotransformátor zaradené odpory. Odpory volíme približne v rozsahu 0-2 Ω , dimenzované na prehádzajúci prúd aspoň 15 A.



Obr. 2.14: Schéma zapojenia pre meranie nakrátko

Namerané hodnoty z troch meraní nakrátko sú v Tab. C.1. Napätia majú fázové hodnoty, fázové posuvy boli určené na základe priebehov napätí a prúdov zobrazených na osciloskope. Z týchto hodnôt boli vypočítané priemerné hodnoty napätí a prúdov zo všetkých fáz, dopočítané hodnoty účinníkov $\cos \varphi_k$, príkonov P_k a modulov pomerných impedancií nakrátko z_k pre všetky dvojice vinutí. Vypočítané hodnoty z meraní nakrátko sú zhrnuté v Tab. 2.10.

Príklad výpočtu pre druhý riadok Tab. 2.10. Pomerné impedancie boli vypočítané podľa vzťahov z Kap. 1.3.5:

$$I_{k12} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} = \frac{2,8772 + 2,8564 + 2,8408}{3} = 2,8581 \text{ A} \quad (2.8)$$

$$U_{k12} = \frac{U_A + U_B + U_C}{3} = \frac{6,1172 + 6,4934 + 6,2556}{3} = 6,2887 \text{ V} \quad (2.9)$$

Tab. 2.10: Vypočítané hodnoty z meraní nakrátko

Merané vinutia	I_k (A)	U_k (V)	$\cos \varphi_k$ (-)	P_k (W)	z_k (%)	$\mathbf{z_k}$ (%)
1 – 2	2,8581	6,2887	0,9680	52,197	2,7231	$2,6360 + j0,6834$
1 – 3	2,8684	11,8441	0,9953	101,442	5,1286	$5,1045 + j0,4967$
2 – 3	11,6379	3,1248	0,9962	108,567	5,4123	$5,3917 + j0,4714$

Pozn.: Pomerné impedancie sú vzťahnuté na napätie napájaného vinutia

$$\begin{aligned}\cos \varphi_{k12} &= \frac{\cos \varphi_A + \cos \varphi_B + \cos \varphi_C}{3} = \frac{\cos(14,57) + \cos(14,28) + \cos(14,74)}{3} \\ &= 0,9680\end{aligned}\quad (2.10)$$

$$P_{k12} = 3 \cdot U_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k = 3 \cdot 6,2887 \cdot 2,8581 \cdot 0,9680 = 52,197 \text{ W} \quad (2.11)$$

$$z_{12} = u_{k12} = \frac{U_{k12} \cdot \sqrt{3}}{U_{N1}} \cdot 100 = \frac{6,2887 \cdot \sqrt{3}}{400} \cdot 100 = 2,7231 \% \quad (2.12)$$

$$\sin \varphi_{12k} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{12k}} = \sqrt{1 - 0,9680^2} = 0,2510 \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned}\mathbf{z_{k13}} &= r_{k13} + jx_{rk13} = z_{k12} \cdot \cos \varphi_{12k} + jz_{12k} \cdot \sin \varphi_{12k} \\ &= 2,7231 \cdot 0,9680 + j2,7231 \cdot 0,2510 = (2,6360 + j0,6834) \%\end{aligned}\quad (2.14)$$

Pomerné impedancie jednotlivých vinutí vypočítame podľa rovníc 1.43:

$$\begin{aligned}\mathbf{z_1} &= \frac{1}{2} \cdot (\mathbf{z_{12k}} + \mathbf{z_{13k}} - \mathbf{z_{23k}}) \\ &= \frac{1}{2} \cdot (2,6360 + j0,6834) + (5,1045 + j0,4967) - (5,3917 + j0,4714) \\ &= (1,744 + j0,3543) \%\end{aligned}\quad (2.15)$$

$$\begin{aligned}\mathbf{z_2} &= \frac{1}{2} \cdot (\mathbf{z_{12k}} + \mathbf{z_{23k}} - \mathbf{z_{13k}}) \\ &= \frac{1}{2} \cdot (2,5656 + j0,6834) + (5,3917 + j0,4714) - (5,1045 + j0,496) \\ &= (1,4616 + 0,3290) \%\end{aligned}\quad (2.16)$$

$$\begin{aligned}\mathbf{z_3} &= \frac{1}{2} \cdot (\mathbf{z_{13k}} + \mathbf{z_{23k}} - \mathbf{z_{12k}}) \\ &= \frac{1}{2} \cdot (5,1045 + j0,4967) + (5,3917 + j0,4714) - (2,5656 + j0,6834) \\ &= (3,9301 + j0,1423) \%\end{aligned}\quad (2.17)$$

Skutočné hodnoty impedancií vypočítame podľa vzťahov 1.43, je nutné rešpektovať zapojenie jednotlivých vinutí:

$$\mathbf{Z}_1 = \frac{\mathbf{z}_1}{100} \cdot \frac{U_{N1}^2}{S_{N1}} = \frac{(1,1744 + j0,3543)}{100} \cdot \frac{400^2}{2000} = (0,939489 + j0,283452) \Omega \quad (2.18)$$

$$\mathbf{Z}_2 = \frac{\mathbf{z}_2}{100} \cdot \frac{U_{N2}^2}{S_{N2}} = \frac{(1,4616 + j0,3290)}{100} \cdot \frac{100^2}{2000} = (0,073080 + j0,016452) \Omega \quad (2.19)$$

$$\mathbf{Z}_3 = \frac{\mathbf{z}_3}{100} \cdot \frac{3 \cdot U_{N3}^2}{S_{N3}} = \frac{(3,9301 + j0,1423)}{100} \cdot \frac{3 \cdot 100^2}{2000} = (0,5895 + j0,002135) \Omega \quad (2.20)$$

Zo vzťahov ekvivalentných z k 1.43 môžeme dopočítať príkony nakrátko pre jednotlivé vinutia:

$$P_{k1} = \frac{1}{2} \cdot (P_{k12} + P_{k13} - P_{23}) = \frac{1}{2} \cdot (52,197 + 101,442 - 108,567) = 22,54 \text{ W} \quad (2.21)$$

$$P_{k2} = \frac{1}{2} \cdot (P_{k12} + P_{k23} - P_{k13}) = \frac{1}{2} \cdot (52,197 + 108,567 - 101,442) = 29,66 \text{ W} \quad (2.22)$$

$$P_{k3} = \frac{1}{2} \cdot (P_{k13} + P_{k23} - P_{k12}) = \frac{1}{2} \cdot (101,442 + 108,567 - 52,197) = 78,91 \text{ W} \quad (2.23)$$

Príkony vypočítané zo skúšky nakrátko vyjadrujú straty vo vinutiach pri ich menovitom výkone ΔP_j . Vypočítané hodnoty modulov impedancií nakrátko, odporov, rozptylových reaktancií, strát vo vinutí a ich pomerných hodnôt jednotlivých vinutí sú zhrnuté v Tab. 2.11.

Tab. 2.11: Výsledné hodnoty z merania nakrátko

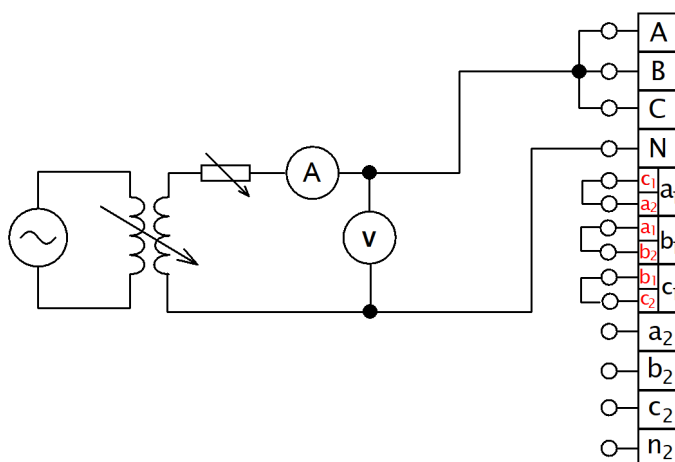
Vinutie	Z		R		X_r		ΔP_j	
	(Ω)	(%)	(Ω)	(%)	(Ω)		(W)	(%)
Primárne	0,9813	1,2267	0,9395	1,1744	0,2835	0,3543	22,54	1,1270
Sekundárne	0,07491	2,7231	0,07308	1,4616	0,01645	0,3290	29,66	1,4830
Terciárne	0,5899	5,1211	0,5895	3,6301	0,02135	0,1423	78,91	3,9455

2.1.8 Meranie netočivej zložky impedancie

Na zistenie netočivých impedancií jednotlivých vinutí boli podľa Kap. 1.3.7 vykonané dve série meraní, pričom v každej boli zmerané 4 dielčie impedancie Z_{10}^0 , Z_{20}^0 , Z_{12k}^0 a Z_{21k}^0 . V prvej sérii bolo terciárne vinutie zapojené do trojuholníka, v druhej bol trojuholník rozpojený. Schéma zapojenia pre meranie naprázdno z primárnej strany (meranie Z_{10}^0) je na Obr. 2.15.

Priebehy napätí a prúdov boli zobrazené pomocou zobrazovača Yokogawa DL-850, ich efektívne hodnoty vypočítané pomocou funkcie RMS a fázové posuvy zmerané kurzormi. Voltmeter a ampérmeter v schéme na Obr. 2.15 reprezentuje prúdovú a napäťovú sondu zobrazovača, pre prúdovú sondu bol použitý rozsah 10A a 100A. V každom meraní sme obvodom pomocou autotransformátora nastavovali menovitý prúd napájaného vinutia, na presnejšie doladenie tejto hodnoty slúžil zaradený potenciometer.

Namerané hodnoty zo všetkých čiastkových meraní a následné vypočítané hodnoty netočivých impedancií sú zhrnuté v Tab. 2.12 a 2.13.



Obr. 2.15: Schéma zapojenia pre meranie netočivej impedancie

Tab. 2.12: Hodnoty z merania čiastkových impedancií pri zapojenom terciárnom vinutí

Meraná impedancia	U_f^0 (V)	I^0 (A)	φ (°)	Z^0 (Ω)	z^0 (%)	z^0 (%)
Z_{10}^0	3,2532	2,8581	29,70	3,4148	1,4228	$1,2359 + j0,7050$
Z_{12k}^0	1,9270	2,8772	18,45	2,0092	0,8372	$0,7942 + j0,2650$
Z_{20}^0	0,7954	11,4065	26,55	0,2092	1,3947	$1,2476 + j0,6234$
Z_{21k}^0	0,4187	11,6057	18,00	0,1082	0,7213	$0,6863 + j0,2230$

Tab. 2.13: Hodnoty z merania čiastkových impedancií pri rozpojenom terciárnom vinutí

Meraná impedancia	U_f^0 (V)	I^0 (A)	φ (°)	Z^0 (Ω)	z^0 (%)	\mathbf{z}^0 (%)
Z_{10}^0	5,1891	2,8763	81,00	5,4122	2,2551	$0,3528 + j2,2273$
Z_{12k}^0	2,3160	2,8781	24,75	2,4140	1,0059	$0,9135 + j0,4211$
Z_{20}^0	1,2398	11,5947	71,10	0,3208	2,1386	$0,6927 + j2,0233$
Z_{21k}^0	0,4749	11,5469	22,05	0,1234	0,8226	$0,7625 + j0,3088$

Príklad výpočtu pre prvý riadok Tab. 2.12:

$$Z_{10}^0 = 3 \cdot \frac{U_f^0}{I^0} = \frac{3,2532}{2,8581} = 3,4148 \Omega \quad (2.24)$$

$$z_{10}^0 = \frac{Z_{10}^0}{3 \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N}} \cdot 100 = \frac{3,4148}{3 \cdot \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 2,887}} \cdot 100 = 1,4228 \% \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_{10}^0 &= z_{10}^0 \cdot \cos \varphi + j z_{10}^0 \cdot \sin \varphi = 1,4228 \cdot \cos(29,70) + 1,4228 \cdot \sin(29,70) \\ &= 1,2359 + j0,7050 \% \end{aligned} \quad (2.26)$$

Výpočet netočivých impedancií terciárneho vinutia:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_{3a}^0 &= \sqrt{z_{20}^0 \cdot (z_{10}^0 - z_{12k}^0)} \\ &= \sqrt{(1,2476 + j0,6234) \cdot [(1,2359 + j0,7050) - (1,2359 + j0,7050)]} \\ &= (0,8344 + j0,5337) \% \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_{3b}^0 &= \sqrt{z_{10}^0 \cdot (z_{20}^0 - z_{21k}^0)} \\ &= \sqrt{(1,2359 + j0,7050) \cdot [(1,2476 + j0,6234) - (0,6863 + j0,2230)]} \\ &= (0,8344 + j0,5337) \% \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\mathbf{z}_3^0 = \frac{\mathbf{z}_{3a}^0 + \mathbf{z}_{3b}^0}{2} = (0,7958 + j0,5390) \frac{\mathbf{z}_{3a}^0 + \mathbf{z}_{3b}^0}{2} = (0,7958 + j0,5390) \% \quad (2.29)$$

Výpočet netočivých impedancií primárneho a sekundárneho vinutia:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_1^0 &= \mathbf{z}_{10}^0 - \mathbf{z}_3^0 = (1,2359 + j0,7050) - (0,7958 + j0,5390) \\ &= 0,4401 + j0,1659 \% \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} z_2^0 &= z_{20}^0 - z_3^0 = (1,2476 + j0,6234) - (0,7958 + j0,5390) \\ &= 0,4519 + 0,08439 \text{ \%} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Výpočet netočivej impedancie magnetizačnej vetvy:

$$z_\mu^0 = \frac{\sqrt{Z_{20}^0 \cdot (Z_{10}^0 - Z_{12k}^0)} + \sqrt{Z_{10}^0 \cdot (Z_{20}^0 - Z_{21k}^0)}}{2} = 0,02343 + 1,9102 \text{ \%} \quad (2.32)$$

V Tab. 2.14 sú zhrnuté moduly, reálne a imaginárne časti netočivých impedancií a ich percentuálne hodnoty. Hodnoty sú vzťahované na stranu daného vinutia, magnetizačná vetva je vzťahovaná na primárne vinutie.

Tab. 2.14: Skutočné a percentuálne hodnoty netočivých impedancií

	Z^0		R^0		X^0	
	(Ω)	(%)	(Ω)	(%)	(Ω)	(%)
Primárne vinutie	1,1288	0,4703	1,0562	0,4401	0,3982	0,1659
Sekundárne vinutie	0,06896	0,4597	0,06779	0,4519	0,01265	0,08439
Terciárne vinutie	0,1442	0,9612	0,1194	0,7958	0,08085	0,5390
Magnetizačná vetva	4,5848	1,9103	0,05623	0,02343	4,5845	1,9102

2.2 Laboratórny návod

2.2.1 Ciele úlohy

Laboratórna úloha je zameraná na meranie symetrických zložkových impedancií trojvinutového transformátora a zoznámenie s meracími prístrojmi použitými pri tomto meraní.

2.2.2 Zadanie

1. Zmerajte odpory vinutí pomocou ohmovej metódy.
2. Meraním naprázdno určte priečnu súslednú impedanciu náhradnej schémy transformátora. Porovnajte výsledky s odpormi meranými pomocou ohmovej metódy.
3. Meraním nakrátko určte pozdĺžne súsledné impedancie náhradnej schémy transformátora
4. Zmerajte netočivé zložky impedancie
5. Z výsledkov zostavte prehľadné tabuľky so skutočnými aj pomernými hodnotami súsledných a netočivých impedancií všetkých vinutí.

2.2.3 Teoretický úvod

Meranie odporu vinutí

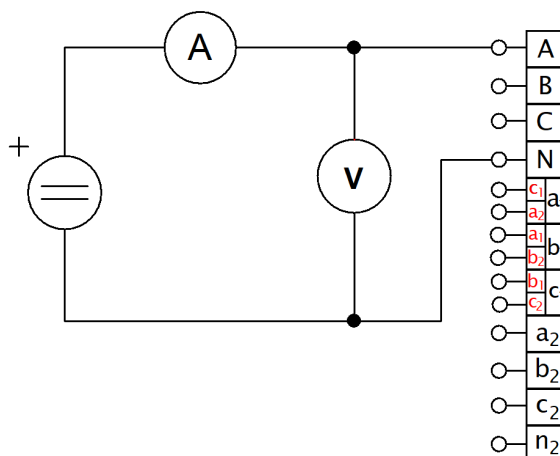
Odpor vinutí meriame pomocou ohmovej metódy pre každú fázu jednotlivých vinutí. Ohmova metóda je založená na ohmovom zákone, kedy odpor vinutia bude rovný podielu napájacieho napätia a prechádzajúceho prúdu:

$$R = \frac{U}{I} \quad (2.33)$$

Odpor jedného vinutia sa vypočíta ako priemer hodnôt nameraných v jednotlivých fázach:

$$R_1 = \frac{R_A + R_B + R_C}{3} \quad (2.34)$$

Namerané odpory v tomto cvičení budú mať len informatívny charakter pre porovnanie s odpormi nameranými pri skúške nakrátko.



Obr. 2.16: Schéma zapojenia pre meranie odporu vinutí

Meranie naprázdno

Účelom merania naprázdno je určenie strát v magnetickom obvode a percentuálnej hodnoty odoberaného prúdu naprázdno zo siete. Z nameraných hodnôt dopočítame súslednú (spätnú) impedanciu priečnej vetvy náhradnej schémy transformátora - magnetizačnú reaktanciu X_μ a odpor reprezentujúci straty v železe R_{Fe} . Pri meraní naprázdno nastavujeme napájanému vinutie menovité napätie, pričom ostatné vinutia sú rozpojené. Meranie naprázdno môžeme vykonať z ktorejkoľvek strany transformátora.

Pri zanedbaní strát vo vinutí naprázdno sa bude nameraný príkon naprázdno rovnáť stratám v železe:

$$P_0 = \Delta P_{Fe} \quad (2.35)$$

Pomerná hodnota prúdu naprázdno pri menovitom napätí:

$$i_0 = \frac{I_0}{I_N} \cdot 100 \quad (2.36)$$

Výpočet magnetizačného prúdu a prúdu určujúceho straty v železe:

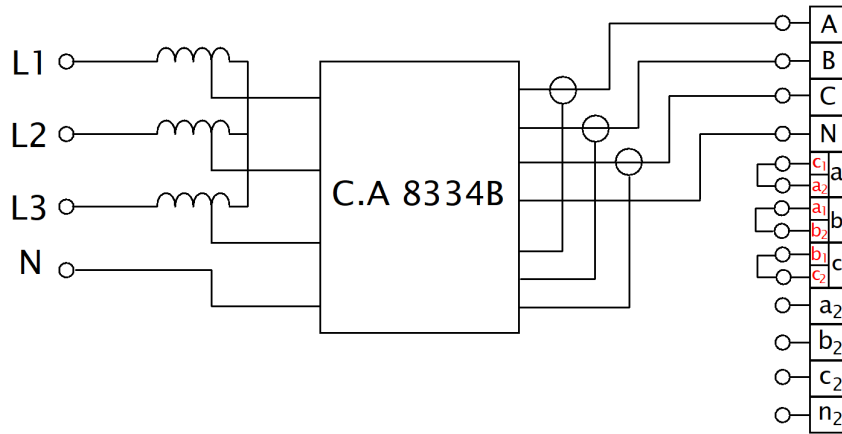
$$I_\mu = I_0 \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0} \quad (2.37)$$

$$I_{Fe} = I_0 \cdot \cos \varphi_0 \quad (2.38)$$

Výpočet prvkov náhradnej jednofázovej schémy:

$$X_\mu = \frac{U_0}{\sqrt{3} \cdot I_\mu} \quad (2.39)$$

$$R_{Fe} = \frac{U_0}{\sqrt{3} \cdot I_{Fe}} \quad (2.40)$$



Obr. 2.17: Schéma zapojenia pre meranie naprázdno

Meranie nakrátko

Trojfázovým meraním nakrátko určíme súslednú (spätnú) zložku pozdĺžnej impedancie transformátora, vyčíslime jej reálnu časť - odpory jednotlivých vinutí R a imaginárnu časť - rozptylové reaktancie X_r .

Meranie nakrátko bude zložené z troch čiastkových meraní, kedy sa premerajú všetky dvojice vinutí tak, že je vždy jedno vinutie napájané, jedno skratované a tretie rozpojené. Princíp merania nakrátko spočíva v tom, že nastavujeme také napätie, aby napájaným vinutím prechádzal jeho menovitý prúd.

Pomerná impedancia nakrátko sa rovná pomernému napätiu nakrátko, platí:

$$z_{12} = u_{12k} = \frac{U_{12k}}{U_{1N}} \quad (2.41)$$

Pomocou fázového posuvu medzi napätím nakrátko a prechádzajúcim prúdom vypočítame reálnu a imaginárnu časť pomernej impedancie nakrátko:

$$\mathbf{z}_{12} = r_{12} + jx_{12} = z_{12} \cdot \cos \varphi_{12k} + jz_{12} \cdot \sin \varphi_{12k} \quad (2.42)$$

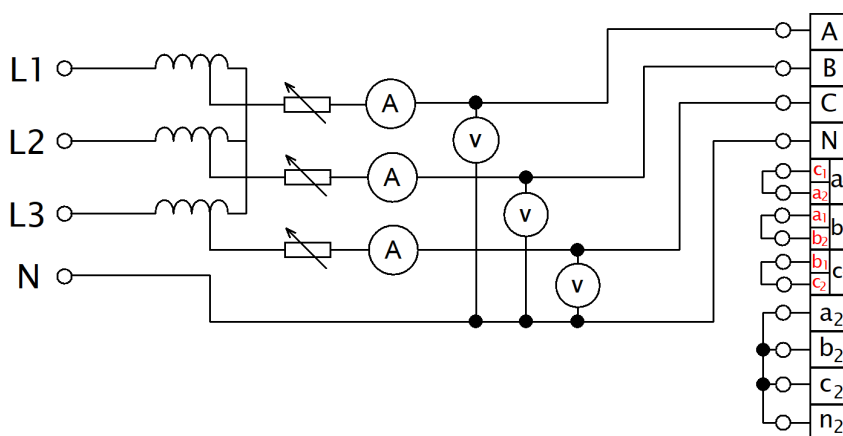
Pre pomerné impedancie jednotlivých vinutí platí:

$$\begin{aligned} z_1 &= \frac{1}{2} \cdot (z_{12} + z_{13} - z_{23}) \\ z_2 &= \frac{1}{2} \cdot (z_{12} + z_{23} - z_{13}) \\ z_3 &= \frac{1}{2} \cdot (z_{13} + z_{23} - z_{12}) \end{aligned} \quad (2.43)$$

Pre skutočné hodnoty impedancií jednotlivých vinutí platí:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_1 &= z_1 \cdot \frac{U_{N1}^2}{S_{N1}} \\ \mathbf{Z}_2 &= z_2 \cdot \frac{U_{N2}^2}{S_{N2}} \\ \mathbf{Z}_3 &= z_3 \cdot \frac{U_{N3}^2}{S_{N3}} \end{aligned} \quad (2.44)$$

Po zanedbaní magnetizačnej vetvy pri meraní nakrátko sa budú namerané príkony nakrátko rovnat stratám vo vinutí. Pre straty v jednotlivých vinutiach pri ich menovitom zaťažení platia vzťahy ekvivalentné ku 2.43.



Obr. 2.18: Schéma zapojenia pre meranie nakrátko

Meranie netočivých impedancií

Na vyjadrenie netočivej zložky impedancie trojvinutového transformátora je nutné zmerať čiastkové impedancie nakrátko a naprázdno. Budú vykonané dve série meraní, pre každú z nich sa vykonajú 4 dielčie merania pre \mathbf{Z}_{10}^0 , \mathbf{Z}_{20}^0 , \mathbf{Z}_{12k}^0 a \mathbf{Z}_{21k}^0 .

Z_{10}^0 - Netočivá impedancia naprázdno z primárnej strany. Všetky fázy primárneho vinutia sú napájané z jedného zdroja, sekundárne vinutie je rozpojené.

Z_{20}^0 - Netočivá impedancia naprázdno zo sekundárnej strany. Všetky fázy sekundárneho vinutia sú napájané z jedného zdroja, primárne vinutie je rozpojené.

Z_{12k}^0 - Netočivá impedancia nakrátko z primárnej strany. Všetky fázy primárneho vinutia sú napájané z jedného zdroja, sekundárne vinutie je nakrátko.

Z_{21k}^0 - Netočivá impedancia nakrátko zo sekundárnej strany. Všetky fázy sekundárneho vinutia sú napájané z jedného zdroja, primárne vinutie je nakrátko.

Výpočet modulu impedancie z merania a prepočet na pomerné jednotky:

$$Z_{10}^0 = 3 \cdot \frac{U_f^0}{I^0} \quad (2.45)$$

$$z_{10}^0 = \frac{Z_{10}^0}{3 \cdot Z_N^0} = \frac{Z_{10}^0}{3 \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N}} \cdot 100 \quad (2.46)$$

Pomocou fázového posuvu medzi napätím a netočivým prúdom vypočítame reálnu a imaginárnu časť pomernej netočivej impedancie:

$$z_{10}^0 = z_{10}^0 \cdot \cos \varphi + j z_{10}^0 \cdot \sin \varphi \quad (2.47)$$

Pri prvej sérii meraní bude terciárne vinutie zapojené do trojuholníka - Obr. 2.19. Tým získame netočivé impedancie jednotlivých vinutí:

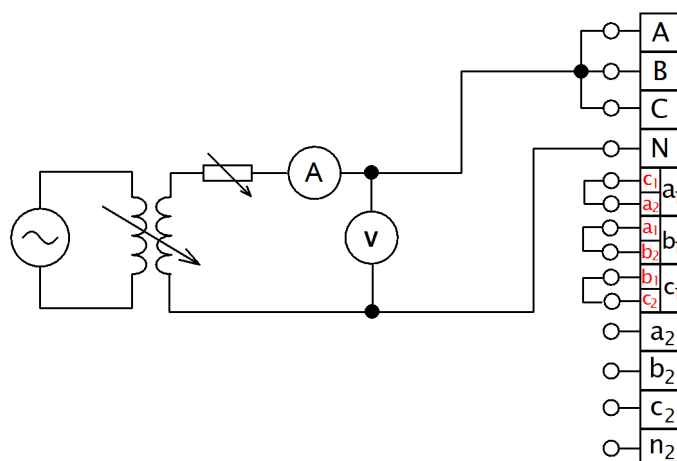
$$z_1^0 = z_{10}^0 - z_3^0 \quad (2.48)$$

$$z_2^0 = z_{20}^0 - z_3^0 \quad (2.49)$$

$$z_3^0 = \frac{\sqrt{z_{20}^0 \cdot (z_{10}^0 - z_{12k}^0)} + \sqrt{z_{10}^0 \cdot (z_{20}^0 - z_{21k}^0)}}{2} \quad (2.50)$$




V druhej sérii meraní bude terciárne vinutie rozpojené. Tým získame impedanciu magnetizačnej vetvy:

$$z_\mu^0 = \frac{\sqrt{z_{20}^0 \cdot (z_{10}^0 - z_{12k}^0)} + \sqrt{z_{10}^0 \cdot (z_{20}^0 - z_{21k}^0)}}{2} \quad (2.51)$$



Obr. 2.19: Schéma zapojenia pre meranie netočivej impedancie

2.2.4 Postup merania

1. Zapojte pracovisko podľa schémy na Obr. 2.19. Prúd prechádzajúci vinutím zvolte v rozsahu 0,5 - 1,5 A. Vykonajte celkom 9 meraní pre všetky vinutia v jednotlivých fázach. Pomocou vzťahov 2.33 a 2.34 vypočítajte odpory primárneho, sekundárneho a terciárneho vinutia.
2. Zapojte pracovisko podľa schémy na Obr. 2.17. Na prúdových senzoroch nastavte rozsah 5 A. V nastaveniach prístroja (tlačítko ) v položke „CURRENT SENSOR“ zvolte typ prúdových senzorov - MN93A a požadovaný prúdový deľič. Ďalej nastavte v položke „CONNECTION“ trojfázovú sieť s pripojeným nulovým vodičom. Pomocou tlačítka  a šípiek zobrazíte priebehy a hodnoty meraných združených/fázových napätí a prúdov. Tlačítkom  a šípkami zobrazíte hodnoty výkonov a účinníkov v jednotlivých fázach a rovnako aj trojfázové výkony a účinník. Pomocou vzťahov z teoretického úvodu vypočítajte pomernú hodnotu prúdu naprázdno a prvky priečnej vetvy náhradnej schémy.
3. Na Obr. 2.18 je schéma zapojenia pre meranie nakrátko pre kombináciu primárneho a sekundárneho vinutia. Obdobným spôsobom zmerajte aj zvyšné dve kombinácie vinutí pomocou zobrazovača Yokogawa DL-850. V schéme na značia voltmetre/ampérmetre napäťové a prúdové sondy zobrazovača. **Napäťové sondy pripojte k modulom s označením 701260, prúdové prevodníky k modulom 701261.** Pre prúdové sondy použite rozsah 10A pri napájaní zo strany primárneho vinutia, rozsah 100A pri napájaní zo strany sekundárneho/terciárneho vinutia. Zvolený rozsah nastavte aj v príslušných kanáloch zobrazovača, položka „Probe“ - 0,1 V/A alebo 0,01 V/A. Vo všetkých používaných kanáloch nastavte „Coupling“ na „AC“.

Pre zobrazenie priebehov nastavte kolečkom „Horizontal Time/div“ približne na 1 s/div. Priebehy si následne priblížte pomocou funkcie zoom. Stlačte tlačítko „ZOOM“, vyberte „Zoom1“, „Display“ a „ON“. Pomocou kolečiek „Mag“ a „Position“ nastavte vhodný zoom z hlavného priebehu.

Pre zobrazenie efektívnych hodnôt napätí a prúdov po stlačení tlačítka „START/STOP“ využijeme funkciu Measure. Stlačte „Measure“, vyberte „Mode“ a „ON“. V „Measure setup“ - „trace“ zvolte kanál, z ktorého sa bude zobrazovať meraná hodnota. V menu „Item“ zvolte pomocou šípiek „RMS“. Rovnakým spôsobom nastavte všetky kanály, u ktorých chcete po stlačení „START/STOP“ zobrazovať efektívne hodnoty.

Pre presnejšie nastavenie prúdu v jednotlivých fázach sú za autotransformátorom zaradené potenciometre. Je preto vhodné, aby sme videli efektívne hodnoty prúdov v reálnom čase. Na to využijete funkciu RealTime Math. V nastavení nepoužívaného kanála zapnite matematiku v reálnom čase „RealTime Math“ - „ON“. V menu „RealTime Math Setup“ zvolte „Operation“ - „RMS“. V ponuke „Source“ vyberte kanál, ktorý bude zdrojom pre výpočet. Rovnakým spôsobom nastavte RealTime Math pre prúdy vo všetkých fázach. Pri meraní stlačte dva krát tlačítko „ESC“, pričom sa v zobrazia okamžité hodnoty všetkých aktívnych kanálov.

Fázové posuvy medzi napätím a prúdom zmeriate pomocou kurzorov. Zapnite ich pomocou tlačítka „Cursors“ - „type“ - „Vertical“. Zvoľte daný kurzor a pohybujte sa pomocou šípiek. Druhou možnosťou je uloženie nameraných dát a následný výpočet fázového posuvu v PC. Hodnoty uložíte pomocou „File“ - „Save“ - „Waveform“ - „Execute save“. V menu „Waveform“ sú ďalšie nastavenia: „Waveform Save Setup“ - nastavenie požadovaných kanálov, typ súboru, oddelenie jednotlivých hodnôt a pod., „Data type“ - zvolte ASCII, „Range“ - možnosť „Main“ ukladá celý priebeh a „Zoom“ priblíženú oblasť. Po pripojení USB disku sa hodnoty ukladajú priamo naň.

4. Zmerajte čiastkové impedancie potrebné pre výpočet netočivých impedancií jednotlivých vinutí a magnetizačnej vetvy pomocou zobrazovača Yokogawa DL-850. Vykonajte prvú sériu meraní impedancií Z_{10}^0 , Z_{20}^0 , Z_{12k}^0 a Z_{21k}^0 pri terciárnom vinutí zapojenom do trojuholníku. V druhej sérii meraní rozpojte terciárne vinutie a zmerajte impedancie Z_{10}^0 , Z_{20}^0 , Z_{12k}^0 , Z_{21k}^0 znova. Schéma zapojenia pre meranie Z_{10}^0 so zapojeným terciárnym vinutím je na Obr. 2.19. Vypočítajte pomocou vzťahov z teoretického úvodu netočivé impedancie jednotlivých vinutí a magnetizačnej vetvy. Pri všetkých meraniach nastavujte pomocou autotransformátora a potenciometra napätie tak, aby obvodom prechádzal menovitý prúd napájaného vinutia. Pre nastavenie zobrazovača Yokogawa DL-850 platí rovnaký postup ako v predchádzajúcom bode.

3 ZÁVER

Meracie pracovisko bolo navrhnuté z hľadiska dostupnosti meracích prístrojov. Analyzátor siete Chauvin Arnoux C.A 8334B bol použitý pri meraní naprázdno z hľadiska jednoduchšej obsluhy pri meraní neharmonickkej záťaže. Analyzátor ale nebol vhodný pre ostatné merania (meranie nakrátko, netočivé impedancie), pretože zmeria napätie najmenej 6 V proti zemi. Pre meranie nakrátko a meranie netočivých impedancií bol zvolený prístroj Yokogawa DL-850. Keďže pri týchto meraniach neboli napätia ani prúdy neharmonické, odčítavali sa fázové posuvy medzi napätiami a prúdmi priamo, bez použitia furierovej transformácie, pričom sme sa nedopustili veľkej chyby merania.

Rozdiely nameraných hodnôt odporov z Kap. 2.1.4 a z merania nakrátko v Kap. 2.1.7 sú spôsobené prechodom striedavého prúdu (vplyv skin efektu), preto sú hodnoty z merania nakrátko vyššie. Ďalší rozdiel mohol vzniknúť s vyšším oteplením vinutia pri meraní nakrátko.

Pre meranie netočivých impedancií existuje viacero metód. Norma [10] uvádza, že v prípade transformátorov, ktoré majú viac ako jedno vinutie zapojené do hviezdy s vyvedeným nulovým vodičom, je impedancia nulovej zložky závislá na spojení a skúška má byť predmetom dohody medzi výrobcom a zákazníkom. Preto je zrejmé, že metód existuje viacero a záleží od konkrétneho výrobcu, typu a výkonu transformátora. Nami zvolená metóda uvažuje zjednodušenie, kedy sa neuvažuje paralelná kombinácia netočivých impedancií Z_{μ}^0 a Z_3^0 ako je v náhradnej schéme na Obr. 1.14, ale netočivá impedancia magnetizačnej vetvy Z_{μ}^0 sa zanedbáva. Tá sa zmeria až s rozpojeným vinutím zapojeným do trojuholníka. Keďže sa netočivá impedancia magnetizačnej vety väčšinou zanedbáva aj vo výpočtoch, mohlo by byť dané meranie aj v našom prípade vynechané.

Meranie na transformátore bolo v prevedené do laboratórnej úlohy. V nej sa nachádza okrem stručného teoretického úvodu a schém zapojení aj presný postup pre meranie s danými prístrojmi. Popisy merania, rovnice a schémy zapojenia boli prevzaté z predchádzajúcich kapitol práce.

LITERATÚRA

- [1] MRAVEC, Rudolf. Elektrické stroje a přístroje: I. Elektrické stroje. Praha: SNTL, 1979.
- [2] HRABOVCOVÁ, Valéria a Pavol RAFAJDUS. Elektrické stroje - Teória a príklady. 2. vydání. Žilina: EDIS, 2015. ISBN 978-80-554-0998-6.
- [3] HRABOVCOVÁ, Valéria, Pavol RAFAJDUS, Marek FRANKO a Peter HUDÁK. Meranie a modelovanie elektrických strojov. 3. vydání. Žilina: EDIS, 2014. ISBN 978-80-554-0852-1.
- [4] PETROV, Georgij Nikolajevič. Elektrické stroje. 1. [díl], Úvod - Transformátory. Praha: Academia, 1980.
- [5] ONDRUŠEK, Čestmír. Elektrické stroje, Elektronické skriptum VUT Brno, FEKT VUT Brno, 2015
- [6] ZÁSKALICKÝ, Pavel. Elektrické stroje. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2015. ISBN 978-80-553-2117-2.
- [7] BARTOŠ, Václav a Bohumil SKALA. Měření na elektrických strojích. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-896-X.
- [8] VARGA, Ladislav a Daniel HLUBENĚ. Meracie metódy v elektroenergetike. Technická univerzita Košice: PRO, 2011. ISBN 9788089057269.
- [9] MEŠTER, Marián. Výpočet skratových prúdov v elektrizačných sústavách. ABB Elektro, s. r. o., Banská Bystrica: PRO, 2005. ISBN 80-89057-10-1.
- [10] ČSN EN 60076-1 Výkonové transformátory - Část 1: Obecně. ČNI červen 2012.
- [11] ČSN IEC 60076-8 Výkonové transformátory - Pokyny pro použití. ČNI září 2000.
- [12] Determination of Parameters of Zero-Sequence Equivalent Circuits for Three-Phase Three-Legged YNyn_d Transformers Based on Onsite Low-Voltage Tests IEEE Xplore [online]. 2013. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6515365/>
- [13] Measurement of zero sequence impedance for three-winding transformers. THE SINGAPORE ENGINEER [online]. 2010, 2010(Jan) [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.jmpangseah.com/wp-content/uploads/2003/07/chapter-15.pdf>

- [14] Core type and shell type transformer windings. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Transformer#/media/File:Transformer_winding_formats.jpg

ZOZNAM PRÍLOH

A	Namerané hodnoty napätia a prúdu a výpočet odporu	68
B	Namerané hodnoty zo skúšky naprázdno	70
C	Namerané hodnoty zo skúšky nakrátko	73

A NAMERANÉ HODNOTY NAPÄTIA A PRÚDU A VÝPOČET ODPORU

Tab. A.1: Hodnoty odporov primárnych vinutí

Vinutie	U (V)	I (I)	R (Ω)	\overline{R} (Ω)
A	0,370	0,403	0,918	0,920
	0,500	0,542	0,923	
	0,650	0,707	0,919	
B	0,370	0,401	0,923	0,923
	0,460	0,500	0,920	
	0,650	0,701	0,927	
C	0,360	0,397	0,907	0,911
	0,460	0,503	0,915	
	0,640	0,701	0,913	

Tab. A.2: Hodnoty odporov sekundárnych vinutí

Vinutie	U (V)	I (A)	R (Ω)	\overline{R} (Ω)
a_2	0,049	0,800	0,061	0,062
	0,062	1,000	0,062	
	0,088	1,400	0,063	
b_2	0,054	0,800	0,068	0,065
	0,064	1,000	0,064	
	0,090	1,400	0,064	
c_2	0,057	0,800	0,071	0,069
	0,068	1,000	0,068	
	0,095	1,400	0,068	

Tab. A.3: Hodnoty odporov terciárnych vinutí

Vinutie	U (V)	I (A)	R (Ω)	\overline{R} (Ω)
a	0,442	0,800	0,553	0,551
	0,551	1,000	0,551	
	0,770	1,400	0,550	
b	0,440	0,800	0,550	0,551
	0,552	1,000	0,552	
	0,771	1,400	0,551	
c	0,440	0,800	0,550	0,550
	0,550	1,000	0,550	
	0,772	1,400	0,551	

B NAMERANÉ HODNOTY ZO SKÚŠKY NA- PRÁZDNO

Tab. B.1: Namerané hodnoty zo skúšky naprázdno

Meranie	U_A (V)	U_B (V)	U_C (V)	I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	P (W)	$\cos \varphi_0$ (W)
1	39,1	39,1	39,0	8,8	7,5	7,6	194	0,366
2	49,9	50,7	50,0	8,8	14,6	8,5	295	0,286
3	60,0	59,3	60,1	16,8	8,4	7,8	465	0,416
4	69,8	69,6	70,0	14,5	9,0	7,6	621	0,512
5	80,0	80,4	80,9	13,5	5,9	13,3	862	0,530
6	90,1	89,4	90,5	16,7	7,7	11,3	1039	0,582
7	100,6	100,5	100,7	14,0	11,4	11,5	1231	0,583
8	110,0	110,2	110,3	13,5	12,2	11,8	1437	0,605
9	120,4	120,3	120,4	15,4	10,4	13,3	1712	0,631
10	130,1	129,9	130,1	15,4	11,5	13,2	1938	0,647
11	140,0	139,9	140,2	18,6	12,3	11,4	2197	0,653
12	151,0	151,1	151,4	17,5	12,0	14,7	2521	0,660
13	160,2	160,3	160,9	20,0	8,4	17,9	2873	0,663
14	171,0	170,8	171,0	19,7	12,5	15,0	3135	0,666
15	180,3	180,6	181,0	19,8	10,0	20,8	3509	0,622
16	190,8	190,3	190,6	21,9	17,1	13,5	3664	0,651
17	200,7	200,4	200,8	22,8	15,9	14,2	4028	0,672
18	210,5	210,3	209,9	20,8	15,9	16,7	4363	0,677
19	220,2	219,9	219,8	24,1	20,3	14,9	4667	0,638
20	230,7	231,2	231,1	21,7	17,1	20,7	5192	0,649
21	240,2	240,4	240,9	27,1	11,0	23,1	5709	0,658
22	250,3	249,7	250,2	31,5	17,7	18,9	5988	0,611
23	259,3	259,3	258,7	24,2	21,3	20,7	6234	0,634
24	270,1	270,9	269,8	18,5	28,3	26,0	6550	0,562
25	280,6	279,8	279,6	38,6	30,0	12,2	6960	0,539
26	290,0	290,0	290,2	29,4	21,0	27,3	7778	0,590
27	300,8	300,8	301,0	36,6	22,6	23,5	8210	0,583
28	310,6	310,5	310,3	34,6	27,7	24,6	8600	0,568
29	320,1	319,7	318,9	44,8	35,6	16,3	8840	0,521
30	330,5	330,7	330,2	36,3	30,7	29,5	9650	0,535
31	340,3	340,7	340,4	43,2	31,6	28,1	10210	0,526

Tab. B.1: Namerané hodnoty zo skúšky naprázdno

Meranie	U_A (V)	U_B (V)	U_C (V)	I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	P (W)	$\cos \varphi_0$ (W)
32	350,5	350,3	349,6	53,3	39,4	23,4	10630	0,474
33	360,1	360,5	360,1	45,0	35,5	35,5	11440	0,482
34	370,8	371,9	371,0	49,6	41,0	36,0	11920	0,462
35	380,0	380,5	379,9	51,7	41,6	40,3	12660	0,444
36	389,5	390,5	389,7	58,3	47,0	40,6	13090	0,419
37	399,5	399,9	399,8	64,5	42,6	49,1	14170	0,409

Tab. B.2: Meranie naprázdno

Meranie	U_{10} (V)	I_{10} (A)	P_0 (W)	ΔP_{j0} (W)	ΔP_{Fe} (W)	$\cos \varphi_0$ (-)
1	39,067	0,040	0,970	0,004	0,966	0,366
2	50,200	0,053	1,475	0,008	1,467	0,286
3	59,800	0,055	2,325	0,008	2,317	0,416
4	69,800	0,052	3,105	0,007	3,098	0,512
5	80,433	0,055	4,310	0,008	4,302	0,530
6	90,000	0,060	5,195	0,010	5,185	0,582
7	100,600	0,062	6,155	0,010	6,145	0,583
8	110,167	0,063	7,185	0,011	7,174	0,605
9	120,367	0,065	8,560	0,012	8,548	0,631
10	130,033	0,067	9,690	0,012	9,678	0,647
11	140,033	0,071	10,985	0,014	10,971	0,653
12	151,167	0,074	12,605	0,015	12,590	0,660
13	160,467	0,077	14,365	0,016	14,349	0,663
14	170,933	0,079	15,675	0,017	15,658	0,666
15	180,633	0,084	17,545	0,020	17,525	0,622
16	190,567	0,088	18,320	0,021	18,299	0,651
17	200,633	0,088	20,140	0,021	20,119	0,672
18	210,233	0,089	21,815	0,022	21,793	0,677
19	219,967	0,099	23,335	0,027	23,308	0,638
20	231,000	0,099	25,960	0,027	25,933	0,649
21	240,500	0,102	28,545	0,029	28,516	0,658
22	250,067	0,114	29,940	0,035	29,905	0,611
23	259,100	0,110	31,170	0,034	31,136	0,634

Tab. B.2: Meranie naprázdno

Meranie	U_{10} (V)	I_{10} (A)	P_0 (W)	ΔP_{j0} (W)	ΔP_{Fe} (W)	$\cos \varphi_0$ (-)
24	270,267	0,121	32,750	0,041	32,709	0,562
25	280,000	0,135	34,800	0,050	34,750	0,539
26	290,067	0,130	38,890	0,046	38,844	0,590
27	300,867	0,138	41,050	0,052	40,998	0,583
28	310,467	0,145	43,000	0,058	42,942	0,568
29	319,567	0,161	44,200	0,072	44,128	0,521
30	330,467	0,161	48,250	0,071	48,179	0,535
31	340,467	0,172	51,050	0,081	50,969	0,526
32	350,133	0,194	53,150	0,103	53,047	0,474
33	360,233	0,193	57,200	0,103	57,097	0,482
34	371,233	0,211	59,600	0,123	59,477	0,462
35	380,133	0,223	63,300	0,137	63,163	0,444
36	389,900	0,243	65,450	0,163	65,287	0,419
37	399,733	0,260	70,850	0,187	70,663	0,409

C NAMERANÉ HODNOTY ZO SKÚŠKY NAKRÁTKO

Tab. C.1: Namerané hodnoty zo skúšky nakrátko

	Kombinácia vinutí		
	1-3	1-2	2-3
U_A (V)	11,8305	6,1172	5,2597
U_B (V)	12,1425	6,4934	5,3663
U_C (V)	11,5592	6,2556	5,4732
I_A (A)	2,8682	2,8772	11,5576
I_B (A)	2,8388	2,8564	11,5616
I_C (A)	2,8983	2,8408	11,7945
φ_A (°)	4,95	14,57	4,34
φ_B (°)	5,44	14,28	5,71
φ_C (°)	6,18	14,74	4,86